This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

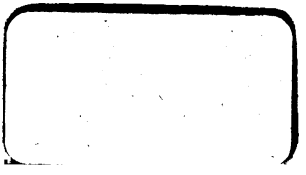
Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 06907445 2

PGE

Lodge



PGE

Lodge

NEUESTE ANSCHAUUNGEN

ÜBER

ELEKTRICITÄT

VON

OLIVER J. LODGE
PROFESSOR DER PHYSIK IN LIVERPOOL

ÜBERSETZT VON

ANNA VON HELMHOLTZ UND ESTELLE DU BOIS-REYMOND

HERAUSGEGEBEN DURCH

RICHARD WACHSMUTH

LEIPZIG
JOHANN AMBROSIUS BARTH
1896

NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
232625
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS
1901

Alle Rechte vorbehalten.

VORWORT ZUR ZWEITEN AUFLAGE

Der Güte von Freunden verdanke ich mehrere, in diese zweite Auflage aufgenommene Berichtigungen und Verbesserungen. Neu hinzugekommen ist ein Kapitel über die neuesten Fortschritte, das von Herrn Fitzgerald durchgesehen worden ist. Herr A. P. Chattock unternahm es freundlicher Weise, einige Abschnitte über die Leitung in Gasen, 65 A, B, C, D, zu schreiben. Die ursprüngliche Numerirung der Abschnitte ist beibehalten, so dass alle neu hinzugekommenen Paragraphen durch Buchstaben ausgezeichnet sind. O. J. L.

VORWORT ZUR ERSTEN AUFLAGE

Die Lehre, die das vorliegende Buch enthält, ist die Aethertheorie der Elektricität. In Kürze können wir sagen: wie die Wärme eine Form der Energie oder eine Art der Bewegung ist, so ist die Elektricität eine Form des Aethers oder eine Art seiner Bethätigung.

Diese Lehre wird schrittweise entwickelt; die Erklärungen im I. Theil machen daher nicht denselben Anspruch auf Ausführlichkeit wie die im II. und III. Theil enthaltenen. Da das Buch für einen wissenschaftlich nur

allgemein gebildeten Leserkreis bestimmt ist, schien es mir erlaubt, meine gewohnte Unterrichtsmethode anzuwenden — nämlich mit wenigen Grundbegriffen anzufangen und diese dann allmählich zu erweitern, statt den Anfänger durch zu eingehende Auseinandersetzungen von vornherein zu überwältigen, entmuthigen und vielleicht zu verwirren. Aus demselben Grunde möchte ich den Leser auch dringend auffordern, das ganze Buch durchzulesen, ehe er mit Hülfe des Inhaltsverzeichnisses einzelne Stellen aufsucht oder Hinweise auf spätere Paragraphen nachschlägt, die ihm am richtigen Ort hoffentlich nützlich sein werden.

Wer sich mit anderen Zweigen der Naturwissenschaft, mit Philosophie oder mit Literatur beschäftigt und daher keine Gelegenheit gehabt hat, den Fortschritten der Physik zu folgen, wird vielleicht staunen, wie vertraut unsere Physiker heute vom Aether sprechen und wie zuversichtlich sie mit ihm experimentiren. Vielen erscheint der Aether vielleicht noch als ein hypothetisches Mittel, dessen Existenz Ansichtssache ist. Dies ist keineswegs der Fall. Die Existenz des Aethers lässt sich mit demselben Recht und in derselben Form bestreiten wie die Existenz der Materie. Aber auch nur so. Das Vorhandensein Beider kann angezweifelt oder weggeleugnet werden, aber die Beweise für den Aether sind nichtsdestoweniger ebenso sicher und direkt wie der für die Luft. Ja, man könnte sogar das Auge ein Sinnesorgan für den Aether nennen,

in demselben Sinne, wie das Ohr ein Sinnesorgan für die Luft ist, und ungefähr in demselben Sinne, wie man die Hände und Muskeln als Sinnesorgane zur Wahrnehmung der gewöhnlichen Materie bezeichnen könnte.

Es kann sein, dass meine Erklärungen im Einzelnen noch unrichtig sind (obschon ich es nicht hoffen will); jedenfalls werden sie noch mancher Verbesserung bedürfen; was aber die Hauptlehre von dem Wesen der Elektricität anbetrifft, so ist sie für mich, obwohl ich sie als „Anschauung" bezeichne, nicht Ansichtssache, sondern Sache der Ueberzeugung. Wenige Thatsachen in der Physik erscheinen mir sicherer als die, dass was wir bis jetzt Elektricität genannt haben, eine Form oder vielmehr eine Art der Bethätigung des Aethers ist. Ausdrücke wie „Elektrisirung" und „elektrisch" mögen fortbestehen; das Wort „Elektricität" wird vielleicht allmählich veralten. Man wird bemerken, dass in der ersten Hälfte des Buches das Wort Elektricität häufig, das Wort Aether dagegen nur selten vorkommt; in der zweiten Hälfte des Buches ist das Umgekehrte der Fall.

Eine ganz allgemein gehaltene, dem populären Verständniss angepasste Behauptung lautet: Elektricität und Aether sind identisch. Damit ist aber nicht Alles gesagt; denn es giebt zwei entgegengesetzte Arten Elektricität, es giebt aber nicht zwei Arten Aether. Dagegen kann man den Aether allerdings auf zwei verschiedene Arten betrachten. Aehnlich wie ein Blatt

Papier zwei Seiten oder ein durchsichtiges Zifferblatt zwei Ansichten hat, so können auch positive und negative Elektricität zwei verschiedene Ansichten oder, wie ich mich manchmal nach Analogie der Chemie ausgedrückt habe, zwei „Bestandtheile" des Aethers sein. Alles was abscheerbar ist (und der Aether ist der Abscheerung durch jede auf ihn einwirkende elektromotorische Kraft unterworfen) muss aus zwei Theilen bestehen, die hinreichend verschieden sind, um in entgegengesetzten Richtungen an einander vorbeiwandern oder verschoben werden zu können.

Wenn diese Behauptung unbestimmt klingt, so liegt dies nur an unserer vorläufigen Unkenntniss vom Bau des Aethers, nicht daran, dass die Beziehungen der Elektricität zum Aether unklar sind oder sich anders gestalten werden, wenn wir die Konstitution des Aethers genauer kennen gelernt haben. Wir wissen zunächst noch nicht viel vom Wesen des Aethers, aber doch nicht so wenig, wie man nach diesen Zeilen vermuthen könnte.

Dasjenige, was wir jetzt zu erforschen haben, ist nicht das Wesen der Elektricität, sondern das Wesen des Aethers. Jede Erklärung schreitet von Stufe zu Stufe fort; keine ist endgültig, jede bedeutet einen Schritt nach oben, ein Aufrücken in ein höheres Gebiet. So gab es eine Zeit, wo man sich das Wesen der Kometen nicht erklären konnte; später stellte sich heraus, dass man es mit einer Form (oder einem Schwarm)

von Meteoren zu thun habe; die Meteore wieder erwiesen sich als Materie — gewöhnlich Eisen oder Stein. Es blieb die Frage: Was ist Eisen oder Stein, oder überhaupt irgend eine Form der Materie? Wärme galt früher für eine Form der Materie; jetzt weiss man, dass sie eine Form der Energie ist. Es bleibt die Frage: Was ist Energie? Die Elektricität hielt man für eine Form der Energie; es hat sich gezeigt, dass sie eine Form des Aethers ist. Die Frage bleibt: Was ist Aether?

Diese Frage ist denn auch das Hauptproblem der physikalischen Welt unserer Zeit. Aber kein unlösbares; es steht vielmehr, meiner Ansicht nach, unmittelbar vor seiner Lösung. Ja dieses Problem ist wahrscheinlich einfacher zu beantworten als die ergänzende Frage, die ihm folgt: Was ist Materie? Einfacher, theils deshalb, weil der Aether einfach ist, während die Materie eine Mehrheit zu sein scheint, theils weil die Gegenwart der Materie den Aether so verändert, dass wir uns unmöglich eine vollständige Theorie über die Eigenschaften der Materie bilden können, ohne zuvor eine ziemlich vollständige Kenntniss der Eigenschaften und Konstitution des Aethers im freien Raum erlangt zu haben. Erst wenn wir diese besitzen, wird die resultirende zusammengesetzte Wirkung dessen, was wir Materie nennen, unserem Verständniss näher kommen.

Könnte ein kontinuirliches, inkompressibles, vollkommenes Fluidum, das den ganzen Raum durchdringt,

in einem solchen Zustand der Bewegung gedacht werden, dass es sämmtliche bekannte Funktionen des Aethers erfüllte; könnte nachgewiesen werden, dass es lediglich durch diese Bewegung die Fähigkeit erhielte, Lichtwellen fortzupflanzen und alle elektrischen und magnetischen Erscheinungen hervorzubringen, die nicht auf der Gegenwart von Materie beruhen; und erwiese sich ein solcher Zustand der Bewegung als wirklich beständig und möglich, so würde die Theorie des Aethers vollständig sein.

Der jüngste Beitrag zu einer solchen Theorie erscheint, während ich schreibe, in einem Brief von Herrn G. F. Fitzgerald an die „Nature" (9. Mai 1889). Das dort gedachte Fluidum, eine in heftiger Wirbelbewegung begriffene Flüssigkeit, die aus schwammähnlich in einander verflochtenen Wirbelfäden besteht, ersetzt alle erforderlichen Eigenschaften des freien Aethers; nnd es erscheint höchst wahrscheinlich, dass diese Bewegung beständig und möglich ist. Der Fitzgerald'sche Aether könnte z. B. aus einer Ansammlung säulenförmiger Wirbel bestehen, die einander in drei Hauptrichtungen in quadratischer (oder kubischer) Anordnung schneiden; benachbarte Wirbel rotiren in entgegengesetzten Richtungen wie auf meinen Querschnittdiagrammen Fig. 37 u. 46, auf denen die rechtsdrehenden Wirbel positive und die linksdrehenden negative Elektricität darstellen. Bis wir in die Nähe von Materie kommen, finden wir als einzigen Unterschied nur vollständigen Gegensatz der Eigenschaften. Ein ziemlich ähnlicher Gedanke wurde von Herrn Hicks ausgearbeitet (siehe § 156). Ferner wies Sir W. Thomson in einer Mittheilung an die Brit. Assoc. vom Jahre 1887 nach, dass eine schichtförmige Anordnung von Wirbeln im Stande ist, Transversalschwingungen (d. h. Licht) hindurchzulassen, allerdings nicht ohne einige Absorption und daher partielle Undurchlässigkeit. (Phil. Mag. Oct. 1887.) Fitzgerald geht nun noch einen Schritt weiter und ersinnt einen faserigen Aether, der nicht blos optisch, sondern

auch elektrisch, allen Ansprüchen genügt. Wenn er sich bewährt und die Probe der Kritik und weiteren Ausführung besteht, dann ist weit mehr als der Anfang zu einer Theorie des freien Aethers gemacht.

Die Theorie des mit der Materie verbundenen Aethers muss zunächst an die Reihe kommen. Durch diese muss neben allen optischen und elektrischen Erscheinungen auch die Schwerkraft und Kohäsion erklärt werden. Sodann müssen die spezifischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten der Materie und das Wesen ihrer sogenannten „Verbindungen" in Angriff genommen werden. Ist dies geschehen, so sind die zahlreichen, unzusammenhängenden Thatsachen der Chemie unter ein umfassendes Gesetz gebracht.

Die nächsten 50 Jahre werden vielleicht Zeuge sein, wie der grössere Theil dieser gewaltigen Siege sich verwirklicht.

University College, Liverpool 13. Mai 1889.

VORWORT DES HERAUSGEBERS

In dem Entschluss, das vorliegende Buch einem grösseren Leserkreis in Deutschland zugänglich zu machen, wurden wir bestärkt durch eine gelegentliche Aeusserung von Hermann von Helmholtz. Er erklärte die eigenartigen Anschauungen des Verfassers einer weiteren Verbreitung für werth. Zwar mag es den deutschen Leser befremden, von auf diesem Gebiete

so tief eingreifenden Arbeiten unserer Landsleute kaum etwas erwähnt zu finden. Auch erwies es sich als unthunlich, diesem Mangel bei der Uebersetzung abzuhelfen, weil eine solche Ueberarbeitung den Charakter des Buches zu sehr verwischt hätte. Aber die besondere Bedeutung dieses Buches beruht ja gerade darauf, dass es ganz einseitig den Standpunkt der englischen Schule, vornehmlich der orthodoxen Schüler Maxwell's, wiedergiebt. Maxwell's Theorie ist aber gegenwärtig durch die epochemachenden Untersuchungen von Hertz vielfach bestätigt und dadurch wieder in den Brennpunkt des Interesses gerückt.

Wie sehr geeignet der Verfasser ist, die Anschauungen dieser Schule zu erläutern, das mag ein Wort von Hertz selbst bekräftigen. In seinen „Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft" (Leipzig 1892) sagt er auf Seite 3:

„Da er (Oliver Lodge) vollständig auf dem Boden der Maxwell'schen Anschauung stand und eifrig bestrebt war, diese Anschauungen zu erweisen, so ist kaum zu zweifeln, dass, wenn ich ihm nicht zuvorgekommen wäre, er auch zur Beobachtung der Wellen in der Luft und damit zum Nachweis der zeitlichen Ausbreitung der elektrischen Kraft gelangt wäre."

INHALT

Seite

Vorwort V

THEIL I

EINLEITUNG UND ELEKTROSTATIK

KAPITEL I

Grundbegriffe 3

KAPITEL II

Das Dielektricum 21

KAPITEL III

Ladung und Induktion 39

THEIL II

LEITUNG

KAPITEL IV

Leitung in Metallen und Elektrolyten 79

KAPITEL V

Stromerscheinungen 106

KAPITEL VI

Chemische und thermische Methoden, einen Strom zu erzeugen. Leitung in Gasen 128

THEIL III

MAGNETISMUS

KAPITEL VII

Beziehungen zwischen Magnetismus und Elektricität 171

KAPITEL VIII

Wesen des Magnetismus 189

KAPITEL IX

Aufbau eines magnetischen Feldes 214

KAPITEL X

Mechanische Modelle eines magnetischen Feldes 224

KAPITEL XI

Mechanische Modelle von Strominduktion 248

THEIL IV

STRAHLUNG

KAPITEL XII

Beziehungen des Aethers zur Elektricität 273

KAPITEL XIII

Konstanten des Aethers 290

KAPITEL XIV

Elektricität, Strahlung oder Licht 304

KAPITEL XV

Wirkung elektromagnetischer und elektrostatischer Erscheinungen auf das Licht 341

KAPITEL XVI

Neueste Fortschritte 376

VORLESUNGEN

VORLESUNG I

Der Zusammenhang von Elektricität und Licht 413

VORLESUNG II

Ueber den Aether und seine Funktionen 431

VORLESUNG III

Die Leydener Flasche 468

ANHANG 497

SACHREGISTER 525

THEIL I

EINLEITUNG UND ELEKTOSTATIK

KAPITEL I

GRUNDBEGRIFFE

1. „Wir wissen nicht, was Elektricität ist", so lautet eine oft gehörte Behauptung, die viel Wahres enthält und doch weniger zutreffend ist, als sie es vor etwa zwanzig Jahren war. Einiges wissen wir jetzt darüber; wenn auch die neuen Ansichten erst im Entstehen begriffen sind und noch mancher Aenderung bedürfen werden, so ist doch ein gewisser Fortschritt zu verzeichnen. Es soll meine Aufgabe sein, in vorliegendem Buch den gegenwärtigen Stand der Forschung auf dem Gebiet der Elektricität nach bestem Können zu schildern.

Zunächst möchte ich, der Uebersichtlichkeit halber, den ganzen Gegenstand in vier grosse Gebiete eintheilen.

(1) Ruhende oder statische Elektricität. Dieses Gebiet umfasst sämmtliche Erscheinungen, welche mit Zwangszuständen in isolirenden oder dielektrischen

Mitteln zusammenhängen und durch die Nähe elektrischer Ladungen oder durch in sie eingebettete, elektrisirte, ruhende Körper hervorgerufen werden; ferner die Methoden, derartige elektrische Ladungen zu erzeugen, und die Gesetze ihrer Wechselwirkungen.

(2) Elektricität in Fortbewegung oder strömende Elektricität. Dieses Gebiet behandelt sämmtliche Erscheinungen, die beim Durchgang der Elektricität durch metallische Leiter, durch chemische Verbindungen und dielektrische Mittel entstehen, sowie die Methoden, Elektricität in dauernde Bewegung zu versetzen, und die Gesetze ihrer Strömung.

(3) Rotirende Elektricität oder Magnetismus. Dieses Gebiet behandelt Erscheinungen, welche dadurch entstehen, dass sich Elektricität in kreisender oder Wirbelbewegung befindet, die Methoden, derartige Wirbel zu erzeugen, die durch sie hervorgerufenen Zwangszustände und die Gesetze ihrer Wechselwirkungen.

(4) Strahlende Elektricität oder elektrische Schwingungen. Dieser Abschnitt behandelt die wellenförmige Fortpflanzung periodischer Störungen in verschiedenen Mitteln; die Gesetze der Wellengeschwindigkeit, Wellenlänge, Reflexion, Interferenz, Dispersion, Polarisation und eine Anzahl von Erscheinungen, die bisher unter dem Namen „Licht“ erforscht wurden. Dieser Theil der elektrischen Wissenschaft, obwohl der dunkelste und schwierigste in ihrem ganzen Bereich, ist uns doch verhältnissmässig länger und genauer bekannt, als irgend ein

anderer Zweig derselben und zwar deshalb, weil wir ein eigenes Sinnesorgan zu seiner Wahrnehmung besitzen.

Um nun eine Uebersicht von mässigem Umfang über diese vier umfassenden Gruppen zu geben, muss ich voraussetzen, dass meine Leser mit den einfachsten Grunderscheinungen der Elektricität bekannt sind, und schreite sofort zu ihrer Erklärung.

2. Unsere Fortschritte in der Erkenntniss des eigentlichen Wesens der Elektricität, abgesehen von der blossen Prüfung und Verallgemeinerung bereits bekannter Thatsachen, knüpfen sich an die Namen der grossen englischen Forscher FRANKLIN, CAVENDISH, FARADAY und MAXWELL, denen der Name THOMSON hinzugefügt werden müsste. Es widerstrebt jedoch unserem Gefühl, über Werke lebender Forscher ein Urtheil zu fällen; auch hat Maxwell seine Verpflichtungen gegen den berühmten Zeitgenossen sehr ausdrücklich anerkannt. Seine Wirksamkeit wird einst von einer berufeneren Feder als der meinigen geschildert und von künftigen Generationen von Forschern gewürdigt werden. Daher dürfen wir wohl, andere Rücksichten bei Seite lassend, Maxwell als den Vertreter der grossen englischen Schule von mathematischen Physikern aufstellen, durch deren Einfluss Cambridge zu neuem, hohem, wissenschaftlichem Leben erwacht ist, und deren grosse Errungenschaften einst den Ruhm unseres Jahrhunderts bilden werden.

Die Ansichten über Elektrisirung, die ich hier darlegen werde, haben sich in gewissem Sinne aus den

Anschauungen entwickelt, die Benjamin Franklin zuerst aussprach. Cavendish's genaue und scharfsinnige Versuche legten den Grund zur heutigen Lehre von der Elektricität; aber er arbeitete mehr für sich als für die Mitwelt und war auf diesem Gebiet seiner Zeit weit voraus. Faraday musste das ganze Feld noch einmal durcharbeiten. In seiner charakteristischen Weise gab er ihm Erweiterungen und Zusätze, wie sie der ausgedehnteren Erkenntniss entsprachen, die ein halbes Jahrhundert später ihm zu Gebote stand. Beide Männer, insbesondere Faraday, verkehrten so innig mit der Natur, dass diese ihnen ihre Geheimnisse in einer Weise offenbarte, die gewöhnlichen Forschern unbegreiflich erscheint; aber während Ideenverbindungen, die an Intuition streifen, sie selbst zur Wahrheit führten, gelang es ihnen nicht immer den eigentlichen Werth der gefundenen Thatsachen ihren Zeitgenossen begreiflich zu machen. Da tritt Maxwell auf. In ihm vereinigen sich tiefste Einsicht, hervorragende Denkkraft, mathematische Schärfe und die Kraft des Ausdrucks. Er macht sich die Thatsachen zu eigen, geht ein auf die zwar wissenschaftliche, aber nicht fachmännische Sprache Faraday's, verknüpft dessen Beobachtungen mit den Theorien von Green, Stokes und Thomson, und aus dieser Vereinigung erwächst die neue elektrische Wissenschaft. Sie zeigt schon jetzt eine so kraftvolle Entwickelung, dass wir für die allernächste Zukunft noch grösseren, glänzenderen Offenbarungen zuversichtlich entgegensehen dürfen.

3. Bekanntlich glaubte man im vorigen Jahrhundert an ein elektrisches Fluidum oder eine elektrische Materie. Später trat eine Reaktion gegen diese Annahme ein. Man neigte sogar vor einigen Jahren dazu, das materielle Wesen der Elektricität gänzlich zu bestreiten und sie nur als eine Energieform aufzufassen. Ein angeborenes aber hier ungerechtfertigtes Gefühl für Analogie führte zu der Vermuthung, dass, wie sich Schall, Wärme und Licht als Energieformen erwiesen hatten, auch die Elektricität als solche erkannt werden würde. Die Erfahrung hat diese Hoffnung nicht bestätigt. Vielleicht ist die Elektricität ein Stoff; Energie ist sie nicht. Allerdings stellt die Elektricität unter der Einwirkung eines *Drucks* oder *in Bewegung* eine Energieform dar; ganz dasselbe gilt aber vom Wasser oder von der Luft, ohne dass wir deshalb deren materielles Wesen läugneten. Man achte auf den Sinn, in dem das Wort Elektricität hier gebraucht ist. *Elektrisirung* ist das Resultat einer geleisteten Arbeit und ist sicherlich eine Energieform; sie wird erzeugt und vernichtet durch eine Arbeitsleistung. *Elektricität* aber wird weder geschaffen noch zerstört; sie wird einfach bewegt oder in Spannung versetzt, wie Materie. Nie ist es gelungen, eine Spur positiver Elektricität hervorzurufen, ohne dass sich die gleiche Menge negativer Elektricität irgendwo ihr gegenüber vorgefunden hätte.

Diese Behauptung lässt sich am einfachsten beweisen

durch Versuche innerhalb eines geschlossenen, leitenden, isolirten Raumes oder Gefässes von beliebiger Grösse. Man mache in einem derartigen Raum sämmtliche bekannte elektrische Versuche, man elektrisire Körper beliebig stark, bewege sie, lasse Funken überspringen u. s. w. und man wird finden, dass ein mit dem Raum verbundenes empfindliches Elektrometer nicht den leisesten, dauernden Ausschlag zeigt; d. h. dass der Raum absolut keine Ladung erhalten hat. Ich sage keinen *dauernden* Ausschlag, weil schwache, vorübergehende Ausschläge während des raschen Ausgleichs innerer Ladungen allenfalls vorkommen könnten. Ob sie möglich sind oder nicht, ist zweifelhaft; jedenfalls aber haben sie mit der gegenwärtigen Frage nichts zu thun. Alle die vorgenommenen Elektrisirungen haben nicht die kleinste Menge von Elektricität erzeugt. Die einzige Art einen Raum zu laden, besteht darin, dass man die Ladung eines anderen Körpers von aussen in ihn einführt.

Dieses ist das erste der beiden grossen Gesetze. Es lässt sich auf die verschiedenste Art ausdrücken. Man kann z. B. sagen: die algebraische Summe der gesammten erzeugten Elektricität ist immer gleich Null; oder: es ist unmöglich, positive Elektricität zu erzeugen, ohne eine gleiche Menge negativer Elektricität zu erhalten; oder: was ein Körper an Elektricität gewinnt, muss ein anderer Körper verlieren.

Wenn man nun beobachtet, dass Etwas in genau

gleichen aber entgegengesetzten Mengen erzeugt wird, und dass ein Körper gewinnt, was der andere verliert, so erscheint es am zweckmässigsten und einfachsten, sich vorzustellen, dass dieses Etwas nicht in dem einen Körper entsteht und in dem anderen vernichtet, sondern dass es einfach *übertragen* wird. *Die Elektricität verhält sich in dieser Beziehung genau wie eine Substanz.* Schon Franklin war zu diesem Schlusse gekommen.

4. Das zweite grosse Gesetz lautet dahin: die Elektricität strömt stets, unter allen Umständen, in einem geschlossenen Kreis und die gleiche Menge durchläuft jeden Abschnitt des Kreises. Es ist also unmöglich, Elektricität an einer Stelle des Raumes zu verdünnen und sie an einer anderen zu verdichten.

Derselbe Gedanke lässt sich noch auf andere Weise ausdrücken: das Innere eines hohlen Leiters nimmt keinerlei Ladung auf, sondern jede Spur einer Ladung befindet sich auf der äusseren Oberfläche, ohne zu einer messbaren Tiefe einzudringen.

Oder man kann auch sagen: die gesammte inducirte Ladung ist stets der inducirenden Ladung gleich und entgegengesetzt.[1])

Auch dieses zweite Gesetz kann mit Hülfe des oben erwähnten isolirten Raumes erläutert werden. Hat man sich davon überzeugt, dass die im Innern vorge-

[1]) § 14a am Schluss des nächsten Kapitels erklärt, inwiefern diese Sätze identisch sind und geht näher auf diesen grundlegenden Theil des Gegenstandes ein.

nommenen Elektrisirungen auf ein mit der Aussenwand verbundenes Elektroskop keine Wirkung ausüben, so führe man durch eine vorübergehend geöffnete Klappe eine elektrische Ladung in den Hohlraum ein. Sofort wird dieser mit einer bestimmten Menge Elektricität geladen, und zwar mit genau der Menge, welche in ihn eingeführt wurde. Die Ladung braucht durchaus nicht den Wänden mitgetheilt zu werden; sie muss sich nur ganz innerhalb derselben befinden. Man kann die Ladung sich frei bewegen oder sie auf die Wände überspringen lassen, ohne dass das Elektroskop dadurch beeinflusst würde. Auch wenn man dieses im Augenblick, wo der Funken überspringt, durch das Mikroskop beobachtet, wird man nicht die leiseste Zuckung daran wahrnehmen. Beide Versuche mit dem Hohlraum wurden von Faraday ausgeführt; zu dem letzteren benutzte er einen Eiseimer als isolirten Raum, was zu dem Namen „Eiseimerversuch" Veranlassung gab.

Um dieselbe Reihe von Thatsachen auch auf andere Weise zu erläutern, bediene man sich eines isolirten Vogelbauers. In diesem befinde sich ein Elektroskop, das durch einen Draht mit den Stäben des Käfigs verbunden sei. Man kann das Bauer nun beliebig stark laden, kann sein Potential von 1 Mill.Volt positiv auf 1 Mill. Volt negativ verändern, kann ihm Funken von jeder Länge entziehen: wenn das Gitter so dicht ist, dass der Käfig als ein wirklich geschlossenes Gefäss zu betrachten ist, so wird das Elektroskop nicht

ausschlagen. Bei diesem Versuch muss das Elektroskop mit den Stäben des Käfigs verbunden sein; ist dies nicht der Fall, so kann das Eindringen von geladener Luft durch das Gitter Störungen hervorrufen. Denn sobald eine Ladung in das *Innere* des Käfigs gelangt, wird das Elektroskop beeinflusst; nur wenn eine Verbindung mit den Wänden besteht, bleibt die Ladung machtlos.

Die offenen Gitterstäbe sind insofern nicht einwurfsfrei, als elektrisirte Luft zwischen ihnen einzudringen vermag; ebenso wie auch ein elektrisirtes Markkügelchen hineingeworfen werden könnte. Diese Fehlerquelle ist auch durch Verengerung des Gitters nicht zu beseitigen; denn elektrisirte Luft, die ich von einer Spitze aus durch sehr feine, zu der Erde abgeleitete Kupfergase trieb, brachte noch starke Wirkungen an einem dahinter aufgestellten Elektroskop hervor.

Ein Raum mit festen Metallwänden wäre freilich gegen derartige Störungen gesichert; hierdurch würde aber die Beobachtung des Elektroskops erschwert. Faraday baute daher eine Kammer, in der er selbst Platz hatte, und führte so den Versuch in befriedigender Weise aus.

Das gründlichste Verfahren, um volle Sicherheit über die Eigenschaft der Elektricität, welche allen diesen Versuchen zu Grunde liegt, zu erhalten, hat Cavendish angewendet in seinem berühmten Experiment, das die Franzosen zuweilen den Biot'schen Versuch nennen.

Er führte einer isolirten, in zwei halbkugelförmigen Hülsen steckenden Kugel eine starke Ladung zu, entfernte die Hülsen auf mechanische Weise und verband die entblösste Kugel sofort mit einem empfindlichen Elektroskop. Nicht die leiseste Spur einer Ladung ist daran nachzuweisen. Dieser Versuch wurde im Laboratorium von Cavendish zu Cambridge durch Clerk Maxwell und Donald Mc. Alister mit einem Quadrant-Elektrometer von Thomson und allen modernen Hülfsmitteln wiederholt und ergab ein vollständig negatives Resultat.[1])

Diese Versuche sind von höchster Bedeutung und grundlegend für die Anschauungen über das Wesen der Elektricität. Ueberlegen wir nun, wie das Gelernte sich am besten ausdrücken lässt.

5. Nachdem wir uns überzeugt haben, dass es unmöglich ist, einen Körper absolut mit Elektricität zu laden; dass diese sich zwar von Ort zu Ort bewegen lässt, dass sie aber stets und sofort den Körper wieder erfüllt, dem sie entzogen war, so dass keine Stelle im Raum mehr oder weniger damit erfüllt werden kann, als dies bereits der Fall ist; dass es unmöglich

[1]) Siehe Maxwell „Electrical Researches of Cavendish" pag. 104 und 417. Ein interessanter kleiner Versuch von Vernon Boys mit Seifenblasen veranschaulicht die Thatsache, dass die elektrische Ladung nicht einmal um die Dicke weniger Molekeln unter die Oberfläche dringt. Eine Seifenblase, die sich innerhalb einer anderen befindet, erweist sich nämlich als vollständig geschützt gegen alle elektrostatischen Kräfte, die man auf sie anzuwenden im Stande ist.

ist, durch irgendwelche Erhöhung des Potentials eine Spur von Elektricität in das Innere eines Hohlraums hineinzupressen; und dass ferner, wenn man eine Ladung einführt, genau die gleiche Menge von Elektricität sofort durch die Wände nach aussen tritt, so bezeichnen wir diese Erscheinung einfach, indem wir sagen: Die Elektricität verhält sich wie eine Substanz oder ein Fluidum von völliger Incompressibilität, das den ganzen Raum erfüllt, d. h. sie verhält sich wie eine vollkommene, alles durchdringende *Flüssigkeit.* Ich will damit keineswegs behaupten, dass die Elektricität eine derartige Flüssigkeit *ist*; ich konstatire nur die unbestreitbare Thatsache, dass sie sich wie eine solche verhält, d. h. dass sie denselben Gesetzen gehorcht. (§ 14a.)

Man hüte sich vor der Vorstellung, dass die Elektricität nothwendig eine Flüssigkeit sein müsse, weil sie denselben Gesetzen gehorcht, und achte stets auf das Strengste darauf, ob sich nicht ein Unterschied in dem Verhalten Beider zeigt. Denn ein einziger unvereinbarer Widerspruch — nicht eine blosse Abweichung, sondern eine wirklich widersprechende Eigenschaft — wäre hinreichend, um den Gedanken an die Möglichkeit einer Identität umzustossen. Bis jedoch ein solcher Widerspruch auftaucht, sind wir berechtigt, ja noch mehr, sind wir gezwungen, die Analogie festzuhalten. Versagen wir uns dieses Hülfsmittel, so bleiben uns nur zwei Auswege: entweder wir müssen Mathema-

tiker ersten Ranges werden, im Stande sein unter Symbolen zu leben und uns ohne bildliche Vergleiche zu behelfen, oder wir müssen über die neuesten Fortschritte auf dem Gebiet der Elektricität im Unklaren bleiben. Ich brauche wohl kaum zu sagen, dass ich unter „*neuesten* Anschauungen" keineswegs *endgültige* Anschauungen verstehe; auch liegt es nicht in meiner Absicht, von den Gedanken und Vorstellungen zu berichten, die, noch halb unfertig, Etlichen der kühnsten Forscher vorschweben mögen; sondern ich will nur versuchen, die Stufe zu bezeichnen, die wir sicher erreicht haben, die Richtung anzugeben, in der unmittelbare Fortschritte bevorstehen, und ich möchte meine Ueberzeugung aussprechen, dass die nächsten fünfundzwanzig Jahre unsere Ansichten eben so rasch überholen werden, als wir die Begriffe überflügelt haben, die in den heutigen Schulbüchern noch enthalten sind.

6. Angenommen, wir lebten, wie die Fische im Meer, in einem unbegrenzten Ocean einer Alles durchdringenden, vollkommenen Flüssigkeit, die sich weder zusammendrücken noch ausdehnen liesse, wie könnten wir das Vorhandensein dieser Flüssigkeit überhaupt gewahr werden? Nicht durch ihr Gewicht, denn wir könnten sie aus keinem Theil des Raums entfernen, um sie zu wägen.

Allerdings vermögen wir die Luft zu wägen, aber nur deshalb, weil wir sie verdichten und verdünnen können. Ehe man ihren Druck und ihr Gewicht be-

stimmen konnte, musste eine Expansions- oder Compressionspumpe erfunden sein.

Wäre die Luft weder compressibel noch ausdehnungsfähig, wäre sie eine vollkommene Flüssigkeit ohne irgend ein Vacuum, so blieben alle Pumpen nutzlos, und es würde unmöglich sein, über Gewicht und Druck der Atmosphäre etwas zu erfahren.

Welche Möglichkeiten haben wir nun, um uns von dem Vorhandensein einer vollkommenen Flüssigkeit zu überzeugen? Vier Wege würden uns offen stehen:

I. Wir pumpen die Flüssigkeit aus einem elastischen Beutel in einen anderen (nicht aus einem Eimer in den anderen, denn wenn wir auf dem Grunde des Meeres lebten, so würden wir nicht Eimer füllen und entleeren wollen; wir könnten nur elastische Beutel füllen oder entleeren) und beobachten die eintretenden Spannungen in dem Beutel, sowie dessen Zerplatzen, wenn er übervoll ist. (Wasser oder Luft kann aus einem elastischen Beutel in einen anderen gepumpt werden. Die Analogie mit einer Elektrisirmaschine, die zwei Leiter entgegengesetzt ladet, d. h. die Elektricität aus dem einen in den anderen pumpt, ist einleuchtend.)

II. Winde und Strömungen. Wir beobachten die Wirkungen, die eintreten, wenn sich die Flüssigkeit durch Röhren oder poröse Körper bewegt, ferner die Wirkungen ihres Beharrungsvermögens und ihrer lebendigen Kraft. (Ein in einer Röhre aufgehängtes Fähnchen, das von einem Wasserstrom abgelenkt wird, liesse sich

ungefähr einem Galvanometer vergleichen; ebenso ist die Wirkung, die z. B. bei einem hydraulischen Widder, durch das plötzliche Aufhalten eines Wasserstromes eintritt, der Selbstinduktion einigermassen analog.)

III. Wir erzeugen Strudel oder Wirbel in der Flüssigkeit und beobachten die Wirkung dieser Wirbel auf einander, ihre Anziehungen und Abstossungen. (Wirbelwinde, Wind- und Wasserhosen, Cyklone, Strudel; Ähnlichkeit mit einem Elektromagnet.)

IV. Wir erregen Wellen in der Flüssigkeit, d. h. wir rufen Erscheinungen hervor, die in gewöhnlichen Medien vermittelst des Ohres in uns die Empfindung erzeugen, die wir „*Schall*" nennen.

Durch diese vier Methoden, und meines Wissens *nur* durch diese sind wir mit der Elektricität bekannt geworden. Sie entsprechen den vier grossen Abtheilungen, die wir am Anfang des Kapitels aufstellten. (§ 1.)

7. Es zeigen sich aber auf den ersten Blick wichtige Unterschiede zwischen dem Verhalten einer materiellen Flüssigkeit, und dem Verhalten der Elektricität. Zunächst ist es zweifelhaft, ob die Elektricität an sich, unabhängig von der Materie, Beharrungsvermögen besitzt. Es ist keineswegs sicher, dass dies nicht der Fall ist. Die von Maxwell vorgenommenen Versuche mit negativem Resultat (§ 39) beweisen mit Nothwendigkeit nur so viel, dass die Elektricität entweder sehr langsam strömt, oder dass der elektrische

Strom aus zwei gleichen Strömen von gleicher lebendiger Kraft aber entgegengesetzter Richtung besteht. Die Gesetze der elektrischen Strömung in Leitern deuten freilich darauf hin, dass kein Beharrungsvermögen vorhanden ist. (§ 48.) Dieser Umstand würde entscheidend sein, wenn nicht Prof. Poynting in einer kürzlich erschienenen ausgezeichneten Arbeit ganz andere Gründe dafür anführte, welche die Frage vorläufig offen lassen. Auf der anderen Seite deuten die Erscheinungen des Magnetismus entschieden auf das Vorhandensein von Beharrungsvermögen oder einer entsprechenden Eigenschaft hin. Lassen wir diese Frage zunächst beiseite; jedenfalls unterliegt es keinem Zweifel, dass, wenn die Elektricität mit isolirender oder dielektrischer Materie verbunden ist, die *Kombination* beider ganz sicher Beharrungsvermögen besitzt. (§§ 38 u. 39.)

8. Bedeutsamer gestaltet sich ein anderer Unterschied zwischen dem Verhalten der Elektricität und dem einer gewöhnlichen incompressibeln Flüssigkeit, der bei dem vierten, die Wellenbewegung betreffenden Abschnitte zum Vorschein kommt. Bei einer inkompressibeln Flüssigkeit würden die Wellengeschwindigkeit und Wellenlänge unendlich sein, und es könnten diejenigen Erscheinungen nicht bestehen, die mit der allmählichen Fortpflanzung der Wellen zusammenhängen. In einem solchen Mittel könnten daher Schallschwingungen im gewöhnlichen Sinne nicht stattfinden. Auf der anderen Seite ist es gewiss, dass die Schwingungen, um die es sich bei der

Lichtstrahlung handelt, und die senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung stattfinden — es sind dies Transversalschwingungen — in einem Körper mit den einfachen Eigenschaften einer gewöhnlichen Flüssigkeit unmöglich fortgepflanzt werden können. Sie können nur durch ein Mittel von einer gewissen Starrheit übertragen werden. Wir müssen also annehmen, dass der Aether zwar flüssig ist in dem Sinne, dass er Körpern gestattet, sich frei hindurchzubewegen, dass er aber für ausserordentlich schnelle und kleine Schwingungen wenigstens eine gewisse Starrheit besitzt. Kann man einer Flüssigkeit solche Starrheit verleihen, ohne sie in einen festen Körper zu verwandeln? Das ist die grosse und schwierige Frage, die ich bereits in der Vorrede angedeutet habe und die ich im XII. Kapitel nochmals berühren werde. Es kann gezeigt werden, dass, obwohl eine Flüssigkeit in Ruhe nicht annäherungsweise die Eigenschaften eines festen Körpers besitzt, diese im Zustand der Bewegung doch von ihr erworben werden. Man treibe Wasser rasch durch einen an beiden Enden befestigten, biegsamen, in sich verschlungenen Gummischlauch, so wird es sofort halbstarr werden; man denke sich nun jedes Theilchen einer Flüssigkeitsmenge im Zustand heftigster Bewegung — nicht der Vorwärtsbewegung, sondern einer Bewegung in winzigen, geschlossenen Kurven, einer sogenannten Wirbelbewegung — auch diese wird starr oder halbfest; sie erlangt die Fähigkeit, transversale Schwingungen fortzupflanzen. Eine rohe Analogie

gewährt die Gallerte. Sie besteht fast ganz aus Flüssigkeit und ist doch starr. Sie ist starr, weil eine elastische Haut jedes Wassertheilchen umschliesst; es ist als bestände sie aus unzähligen Wassersäckchen. Eine Gummiblase, die man mit Wasser füllt und auf einen Teller legt, sieht aus und verhält sich ganz ähnlich wie Gallerte, bis man die Blase ansticht und sie zusammenfällt. Diese festigende Wirkung, die eine elastische Haut auf ruhendes Wasser ausübt, wird besser, wenn auch nicht so leicht nachgeahmt, indem man das Wasser in lauter feine Wirbelbewegungen versetzt. Alle Arten Elasticität erklären sich, wie Sir W. Thomson nachgewiesen hat, einfach durch Bewegung. Nicht als eine einfache Flüssigkeit, sondern als eine Flüssigkeit im Zustande heftiger, ausserordentlich feiner Wirbelbewegung — als ein Wirbelschwamm, wie man sich ausgedrückt hat — wird der Aether schliesslich erkannt werden. Da aber diese Vorstellung vorläufig noch schwer fasslich ist, so geben wir ihr die unbestimmtere Fassung: der Aether enthält Elektricität wie die Gallerte das Wasser enthält, und die Starrheit, welche die Transversalschwingungen ermöglicht, ist keine Eigenschaft des in der Gallerte enthaltenen Wassers, sondern muss zurückgeführt werden auf die Art und Weise, wie das Wasser in den Zellen der Gallerte festgehalten wird.

Vorläufig wollen wir aus praktischen Gründen bei der Annahme bleiben, der Aether bestehe aus Elektricität, die sich in einem ähnlichen Zustand des Ge-

bundenseins befinde wie Wasser in Gallerte; wir werden zu derselben Ansicht gedrängt durch die Forderungen der unter §§ 1 und 6 besprochenen, elektrostatischen oder Spannungsmethode zur Untersuchung der Eigenschaften der Elektricität. Denn ohne eine gewisse Scherungsfestigkeit sind die Eigenschaften der Isolatoren schwer zu begreifen. Sollte es sich herausstellen, dass der Raum ein Leiter ist, was mir freilich völlig ausgeschlossen erscheint, dann werden wir auf die unklare empirische Vorstellung zurückkommen müssen, dass der Aether des Weltenraumes, etwa wie eine Art verklärten Pechs, für rasche Schwingungen fest und für stetige Kräfte flüssig ist.

KAPITEL II

DAS DIELEKTRICUM

9. Wenden wir uns nun wieder der Elektrostatik zu. Wir haben uns also vorzustellen, dass wir, wie Fische im Meer, in dem unbegrenzten, Alles durchdringenden Ocean einer vollkommenen, incompressiblen Flüssigkeit leben. Aber das Bild ist nicht völlig zutreffend, denn befänden wir uns wirklich in diesem Zustande, so würden wir von dem Vorhandensein dieser Flüssigkeit ebenso wenig wissen, als Tiefseefische von dem Wasser wissen, worin sie schwimmen. In dieser Lage würden wir uns befinden, wenn alle Körper vollkommene Leiter wären. In einem vollkommen freien Meer giebt es keine Isolation; kein Hinderniss widersetzt sich den Strömungen der Flüssigkeit. Das Vorhandensein von Isolatoren aber macht allein die Elektrostatik möglich. Wir könnten daher allerdings die Strömung aufhalten und vermittelst geschlossener Gefässe bestimmte Mengen einer uns rings umgebenden Flüssigkeit aufspeichern. Wie aber sollten

wir die Flüssigkeit aus einem Gefäss in das andere pumpen, sodass das eine positiv, das andere negativ geladen würde? Das wird nur möglich, wenn wir deren Wände elastisch machen, oder wenn wir elastische Beutel und elastische Querwände in Röhren anwenden. Wir können uns also ein stetiges, isolirendes Mittel (wie die Atmosphäre oder den Raum) nur vorstellen nach dem Vorbild einer Gallerte, durch welche eine Flüssigkeit nur in Folge von Rissen, Kanälen und Höhlungen hindurchströmen kann.

Denken wir uns nun statt einer unbegrenzten Flüssigkeit eine unbegrenzte Gallerte oder elastische Substanz, in der die Flüssigkeit eingeschlossen ist, und durch die sie sich nicht ohne gewaltsame Zerstörungen bewegen kann, so haben wir das annähernde Bild einer allgemeinen isolirenden Atmosphäre. Unser Ocean von Flüssigkeit ist nicht frei und beweglich wie Wasser, sondern steif und gebunden wie Gallerte.

Nichtsdestoweniger können sich *Körper* frei hindurchbewegen; nur die *Flüssigkeit* selbst ist gebunden. Es ist nicht leicht, sich von der Bewegung gewöhnlicher Körper durch das isolirende Mittel des Weltenraumes ein klares Bild zu machen, ohne über unsere Analogie von der Gallerte hinaus zu jener feineren und wahreren Theorie vom Wirbelschwamm überzugehen; es ist eben bezeichnend für Analogien, dass sie nicht ausreichen, wenn man sie zu weit treibt, so nützlich sie bis zu einem gewissen Punkt sein mögen.

Entsprechen die Isolatoren elastischen Querwänden oder undurchlässigen, obwohl nachgiebigen Massen, so entsprechen die Leiter Hohlräumen, oder vielmehr porösen oder schwammigen Körpern, die unter mehr oder weniger Reibungswiderstand für Flüssigkeiten durchlässig sind. Während also Körper, welche die Materie leicht hindurchlassen, für Elektricität sich als undurchlässig erweisen, so sind z. B. metallische Körper, die dem Eindringen von Materie durchaus widerstehen, für Elektricität vollkommen durchlässig. Diese Umkehr der gewöhnlichen Vorstellungen von Durchlässigkeit wird dem Leser anfangs eine gewisse Schwierigkeit bereiten.

Betrachten wir diese jedoch als überwunden und denken wir uns einige auf dem Experimentirtisch isolirt aufgestellte Kugeln und ihre Verbindungen aus Kupferdraht als ebensoviele Hohlräume und Röhren. Sie sollen sich in einem stetigen und undurchlässigen elastischen Mittel befinden, das sie wie uns umgiebt und sich durch den ganzen Raum erstreckt, soweit keine Leiter darin sind. Die Hohlräume und das Mittel aber sollen gleichmässig erfüllt sein von dem Elektricitätsfluidum. Dieses Fluidum, das in den Isolatoren festgehalten wird, kann sich in den Leitern frei bewegen; daraus folgt, dass sein Druck oder Potential gleich ist in allen Theilen eines Leiters, in dem es sich nicht fortbewegt. Denn wäre irgendwo ein stärkerer Druck vorhanden, so würde alsbald ein Fliessen stattfinden, so

lange bis der Druck ausgeglichen wäre. Bei Isolatoren dagegen ist dies nicht der Fall. Verschiedenheiten des Drucks kommen bei Isolatoren sehr häufig vor und werden selbstverständlich von einer Spannung des Mittels begleitet.

Nun ist es ausserordentlich lehrreich, von diesem Gesichtspunkte aus die gebräuchlichsten elektrischen Versuche wieder durchzugehen; sich vorzustellen, wie das Fluidum ungehindert durch Leiter fliesst und in diesen zu einem Zustand des Gleichgewichts oder des gleichmässig vertheilten Drucks gelangt, während es Isolatoren in Spannung versetzt, ähnlich wie Wasser unter Hochdruck elastische Wände spannt und diese schliesslich sprengt, wenn sie zu dünn sind.

10. Bekanntlich nahm man früher an, die Elektricität sei ein Fluidum; und zwar bestanden hierüber zwei Theorien, die Theorie von Franklin, welche nur *ein* Fluidum, und die Theorie von Symmer und Anderen, welche zwei Fluida annahm. Beide haben innerhalb gewisser Grenzen viel für sich. Allerdings sind sie in vielen Beziehungen vollständig falsch und irreführend; *zu verwerfen sind sie aber nicht deshalb, weil sie das Vorhandensein eines Fluidums voraussetzen, sondern weil sie sich auf die Vorstellung einer Wirkung in die Ferne gründen.* Sie lenken unsere Aufmerksamkeit auf die Leiter; Faraday dagegen lehrte uns unser Augenmerk auf das die Leiter umgebende, isolirende Mittel zu

richten; das „*Dielektricum*", wie er es nannte. Hier ist der eigentliche Sitz sämmtlicher Erscheinungen; die Leiter sind nur Unterbrechungen darin.

Für Faraday war der die Leiter umgebende Raum erfüllt mit „Kraftlinien", und sein Hauptverdienst in der Elektricität besteht darin, dass er unsere Aufmerksamkeit von den äusseren und sichtbaren auf die inneren und wesentlichen Vorgänge gelenkt hat. Versuchen wir seine Anschauungen uns anzueignen, ehe wir fortfahren. So weit sie reichen, sind sie vollständig richtig und frei von Voraussetzungen.

Wenn wir heute den alten, grundlegenden Versuch wieder vornehmen, der darin besteht, dass wir zwei Körper an einander reiben, sie von einander entfernen und ihre Anziehung und Abstossung an einem Markkügelchen zeigen, wie würden wir den Vorgang jetzt schildern? Etwa folgendermassen:

Man bringt zwei isolirte Scheiben aus verschiedenem Stoff, etwa aus Metall und aus Seide, mit einander in Berührung; durch die Berührung geht Elektricität von dem Metall auf die Seide über; man hilft durch Reiben der Uebertragung nach, da Seide ein Nichtleiter ist; hierauf trennt man die Scheiben. Sofort entsteht in dem Mittel zwischen beiden eine Spannung. Diese Spannung lässt sich darstellen, indem man von einer Scheibe zur anderen eine Reihe von Linien, sogenannten Kraftlinien, zieht, deren Richtung mit der Richtung der Spannung an jedem Punkte genau übereinstimmt. Man

hat sich, sagt Faraday, diese Spannung vorzustellen, als ob die Scheiben durch Gummibänder verbunden wären, welche die Eigenschaft besässen, sich nicht blos zusammenzuziehen, sondern auch sich unter einander abzustossen; mit anderen Worten, es besteht sowohl eine Spannung längs der Kraftlinien, als auch ein Druck senkrecht zu ihnen. Bringt man die Scheiben nahe an einander, so sind die Linien kurz und beinahe gerade. (Fig. 1.) Je weiter man aber die Scheiben von einander entfernt, desto stärker krümmen sich die Linien, indem sie dabei von der gemeinsamen Axe der beiden Schei-

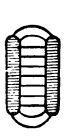


Fig. 1. — Zustand des Mittels in der Umgebung zwei entgegengesetzt geladener Scheiben, die einander genähert sind.

ben abweichen. Einige Linien greifen sogar auf die Rückseite der Scheibe über (Fig. 2), so dass schliesslich, wenn die Scheiben unendlich weit von einander entfernt sind, ebenso viele Linien von ihrer Rückseite ausgehen, wie von ihrer Vorderseite; alsdann haben wir zwei im gewöhnlichen Sinne frei im Raum befindliche, geladene Körper.

Der Spannungs-Zustand des Mediums zwischen den Scheiben erzeugt in Beiden die Neigung, sich wieder zu vereinigen, gleichsam als wären sie mit einander durch Gummibänder, die unendlich kurz waren, ehe

sie gestreckt wurden, verbunden. Die Enden der Kraftlinien sind die sogenannten „Elektrisirungen" oder „Ladungen", und die Linien haben das Streben sich zu verkürzen und zu verschwinden, damit ihre Enden zusammenfallen und die Spannung nachlasse. Wenn eine der beiden Scheiben einen anderen Leiter berührt, so gehen einige ihrer Linien sofort auf diesen über;

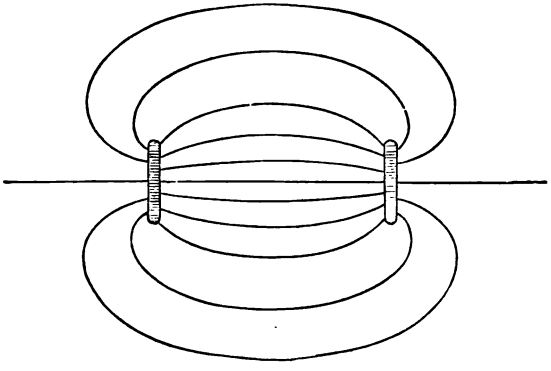


Fig. 2. — Zustand des Mittels in der Umgebung zwei entgegengesetzt geladener Scheiben, die von einander entfernt sind.

d. h. die Ladung ist übertragbar und der neue Körper wird, ganz wie die Scheibe, von der er die Linien übernahm, von der anderen Scheibe angezogen. Wenn der neue Körper die Scheibe vollständig umschliesst, so gehen ihre sämmtlichen Kraftlinien auf ihn über und die Scheibe kann völlig neutral daraus hervorgezogen werden. (Siehe Faraday's Versuch mit dem Eiseimer [§ 4].)

11. Man hänge nun zwischen den zwei geladenen Scheiben ein vergoldetes Markkügelchen auf. Da es ein Leiter ist, so nimmt es selbst keine Spannung an, sondern dient nur gewissermassen als Brücke. Es gehen nämlich einige der Kraftlinien hindurch, oder vielmehr sie hören auf der einen Seite auf und fangen

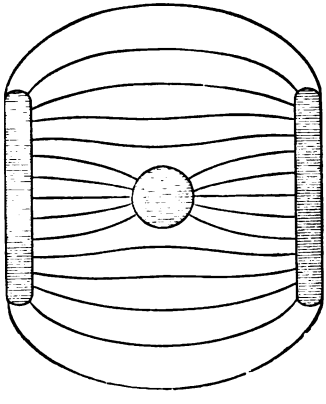


Fig. 3. — Zustand des Mittels zwischen zwei Scheiben, nach Einführung einer ungeladenen Metallkugel. Die beiden Hälften der Kugel sind durch Influenz entgegengesetzt geladen.

auf der anderen wieder an und geben so den beiden Hälften des Kügelchens entgegengesetzte „inducirte" Ladungen. (Fig. 3.) Berührt nun das Kügelchen eine der beiden Scheiben, so verschwinden die Linien, die es mit dieser Scheibe verbanden, und es bleiben nur noch diejenigen Linien bestehen, die zu der anderen Scheibe führen. Es hat, mit anderen Worten,

ohne entsprechende Gegenwirkung einige der Linien aufgenommen, die zuvor der berührten Scheibe angehörten. Diese ziehen es nach der entfernten Scheibe hinüber, um dort gleichfalls sich zu verkürzen und zu ver-

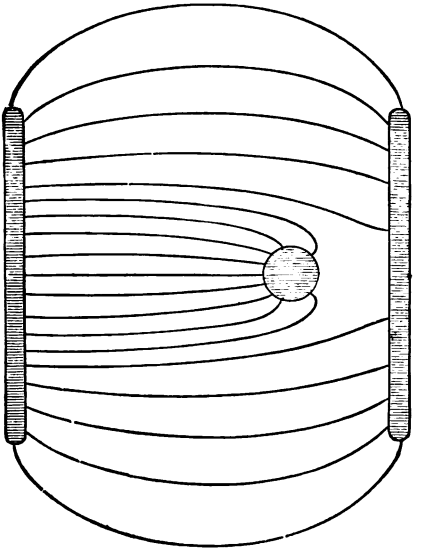


Fig. 4. — Zustand des Mittels in der Umgebung zweier entgegengesetzt geladener Scheiben, zwischen denen eine Metallkugel schwingt, die soeben die rechte Scheibe berührt hat. (Entladung durch abwechselnde Berührung.)

schwinden. Hier übernimmt aber das Kügelchen wieder neue Linien und wandert mit diesen nach der ersten Scheibe zurück, wo sich derselbe Vorgang wiederholt. (Fig. 4.) So sammelt und vernichtet das Kügelchen allmählich sämmtliche Linien, bis schliesslich die Scheiben

entladen sind. Der Versuch lässt sich leicht ausführen; er erläutert das Princip der Entladung durch abwechselnde Berührung.

Diese Art den Vorgang darzustellen ist frei von jeglicher Hypothese — sie ist einfach wahr. Allerdings muss von vornherein zugegeben werden, dass es „Kraftlinien" ebensowenig giebt, wie „Lichtstrahlen". Beides sind Ausdrücke, deren man sich nur aus Bequemlichkeit bedient.

12. Solange wir aber an diesen Ausdrücken festhalten, sind wir nicht im Stande uns ein vollständiges geistiges Bild von den wirklich stattfindenden Vorgängen zu machen. In der Optik kommen wir an einen Punkt, wo wir nicht mehr von Strahlen sprechen, sondern von Wellen, die das eigentliche Wesen der Erscheinung sind, obgleich wir noch wenig über ihre Beschaffenheit wissen.

So giebt es auch in der Elektricität einen bestimmten Punkt, wo wir versuchen müssen, uns von den Kraftlinien und Potentialtheorien loszumachen und uns vorzustellen, dass der eigentliche Stoff verschiedenen Spannungen und Bewegungen unterliegt. Und damit gelangen wir wieder zu einer Ideenfolge, wie sie uns bei der Erklärung des Verhaltens einer incompressiblen Flüssigkeit nützlich gewesen.

Wir dürfen also, wenn auch in ganz anderem Sinne, noch immer von einem elektrischen Fluidum sprechen, sowie wir auch einige Gedanken der alten Theorie in

die neue hinübernehmen können. Zum Beispiel bleibt Franklin's Ansicht auch weiterhin bestehen, dass die positive Ladung eine Vermehrung und die negative Ladung eine Verminderung jener bestimmten Menge von Fluidum ist, die jeder neutrale Körper im normalen Zustande enthält. Ebenfalls trifft seine Ansicht noch zu, dass das Fluidum nirgends erzeugt wird, sondern dass ein Körper verlieren muss, was der andere gewinnt. Auch die Theorie, welche zwei Fluida annimmt, bleibt meiner Ansicht nach, wenn auch nur zum Theil, bestehen (§ 90); doch beabsichtige ich nicht, hier auf diesen Gegenstand näher einzugehen. Es genügt zunächst, wenn wir uns auf die Annahme eines einzelnen Fluidums beschränken.

Man denke sich also die Elektrisirmaschine als eine Pumpe, welche mit zwei Körpern in Verbindung steht und Elektricität aus dem einen in den anderen pumpt, wobei der eine Körper eine positive, der andere eine negative Ladung erhält. Einer der beiden Körper kann die Erde sein; alsdann wird die Ladung ohne wahrnehmbare Wirkung bleiben.

13. Wenn aber, hat man eingewendet, die Elektricität sich wie ein inkompressibles, unausdehnbares Fluidum verhält, wie ist es möglich, einen Theil davon einem Körper zu entziehen und dem anderen mitzutheilen? Bei starren Körpern ist dies nicht möglich; bei elastischen Körpern aber kann es geschehen.

Mithin ladet man eine Kugel ungefähr so, wie man Wasser in einen elastischen Beutel oder, richtiger gesagt, in einen Hohlraum pumpt, der sich inmitten eines elastischen Mediums befindet. (Die dicken Wände dieses Mittels, die sich nach allen Richtungen hin erstrecken und nur einem sehr starken Druck nachgeben, veranschaulichen den Vorgang besser als die dünnen Wände eines elastischen Beutels.)

Man denke sich nun zwei derartige Hohlräume und stelle sich vor, das Fluidum werde aus dem einen in den anderen gepumpt. Es wird alsdann ersichtlich werden, dass die Ladung (d. h. die Vermehrung oder Verminderung des Fluidums) sich auf der Aussenseite befindet.

Ist das Fluidum wirklich incompressibel, so wird der Druck auch nicht das geringste Extra-Quantum in den von dem Beutel ursprünglich eingenommenen Raum hineinpressen können. Dies ist der Sinn des Versuchs von Cavendish (§ 4): er beweist, dass die Elektricität vollständig inkompressibel ist. (Siehe auch § 14 a.)

Ferner wird, wenn beide Höhlungen gleichartig geladen sind, das Mittel so stark gespannt werden, dass die Höhlungen von einander gedrängt werden; während sie, wenn die eine ausgedehnt und die andere zusammengezogen ist, sich zu nähern streben.

Endlich denke man sich zwei Höhlungen neben einander, pumpe das Fluidum in die eine hinein (oder

auch heraus) und beobachte die Wirkung auf die andere. Alsdann wird man die Erscheinung der Influenz wahrnehmen. Die nächstgelegene Wand der anderen Höhlung wird entgegengesetzt geladen werden (d. h. sie wird sich in den Hohlraum zurückziehen); die entferntere Wand wird gleichartig geladen werden (d. h. sie wird aus dem ursprünglichen Hohlraum hinausgedrängt); und der Druck auf das Fluidum in der Höhlung wird zunehmen oder abnehmen, je nachdem der Druck in der geladenen oder influenzirenden Höhlung zunimmt oder abnimmt. Mit anderen Worten, das Potential eines Leiters wächst, wenn er in die Nähe eines positiv geladenen Körpers kommt, und seine Ladung, sofern er eine enthält, bleibt zwar quantitativ dieselbe, erhält aber eine neue Vertheilung.

Unsere Analogie hat den Fehler, dass sie thatsächliche Volumenveränderungen der Höhlungen voraussetzt. Dem lässt sich nur abhelfen, indem man zu einer dualistischen Theorie der Elektricität greift, d. h. zu einer Theorie, die zwei Fluida annimmt, eine Möglichkeit, auf die noch andere Thatsachen hinweisen. Es ist denkbar, dass die beiden Bestandtheile des Aethers an einander vorbeischeren, sodass in der geladenen Höhlung der eine in dem Maasse zunimmt, wie der andere abnimmt; dadurch würde eine Spannung entstehen, die weder ein Ausdehnen, noch ein Zusammenziehen des Volumens erforderte und welche die Gesammtmenge des Aethers überall unverändert liesse. (Vergl. § 18.)

14. *Rückleitung.* — Es ist nicht immer leicht, sich vorzustellen, dass die Elektricität in einem geschlossenen Kreise fliesst, so z. B. wenn wir nach Amerika telegraphiren und die Erde als Rückleitung benutzen, fragen wir uns: Wie findet die Elektricität den richtigen Weg zurück?

In Wirklichkeit ist die Schwierigkeit nicht grösser, als wenn wir uns eine Röhre denken, die nach Amerika reicht, an beiden Enden mit dem Meer in Verbindung steht und ganz mit Wasser angefüllt ist. Pumpt man nun an dem einem Ende etwas mehr Wasser in die Röhre, so wird am anderen Ende die gleiche Menge Wasser herausfliessen und das gestörte Niveau des Oceans wird sich wieder herstellen. Dasselbe Wasser kehrt nicht zurück, sondern nur eine gleiche Menge von Wasser. Dasselbe behaupten wir von der Elektricität. Freilich kann man sie nicht mit einem Zeichen versehen und daran wiedererkennen.

Will man sich zugleich die Selbstinduktion eines Kabels veranschaulichen, so muss man sich die Röhre mit mässig elastischen Wänden versehen denken; um ausserdem dieselbe Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu erzielen wie bei einem elektrischen Signal, müsste man sich das Wasser als vollständig inkompressibel vorstellen, nicht als elastisch, wie es in Wirklichkeit ist; sonst würde jeder Stromstoss sogar in einer vollständig starren Röhre dreiviertel Stunden unterwegs sein.

14a. *Inkompressibilität der Elektricität.* — Die Aequi-

valenz der verschiedenen Sätze zu Anfang des § 4 scheint nicht ganz klar zum Ausdruck gelangt zu sein. Es ist aber wohl der Mühe werth, auf diesen wichtigen Punkt ausführlicher zurückzukommen. Eine der ersten experimentellen Erfahrungen in der Elektricität ist die, dass man eine isolirte Kammer nicht laden kann, indem man darin elektrische Versuche vornimmt. Die Elektrisirmaschine im Innern einer leitenden Kammer und das Elektroskop ausserhalb derselben sind vollständig unabhängig von einander. Mit anderen Worten: das Kraftfeld ausserhalb eines Leiters ist unabhängig von dem Kraftfeld innerhalb desselben; es findet durch den Leiter eine vollständige Unterbrechung sämmtlicher Kraftlinien statt; ein geschlossener Leiter wirkt wie ein vollkommener elektrostatischer Schirm. Eine zweite grundlegende Erfahrung lehrt, dass, wenn man eine Ladung auf irgend eine Weise dem Innern eines hohlen Leiters mittheilt, genau die gleiche Menge sofort auf seiner äusseren Oberfläche erscheint. Entfernt man diese Oberfläche, so entfernt man zugleich die Ladung und keine Spur bleibt unterhalb derselben zurück.

Diese beiden Thatsachen führen zu der Behauptung, dass die Elektricität sich wie ein inkompressibles Fluidum verhält, mit dem der ganze Raum erfüllt ist; ein Fluidum, das nicht erzeugt, sondern nur umherbewegt werden kann. Man denke sich nämlich im Meer ein geschlossenes Gefäss, in dem sich Pumpen befinden. Sind die Wände vollständig dicht, so wird das angestrengteste

Pumpen nicht einen Tropfen Flüssigkeit mehr in das Gefäss hineinbringen, als es vorher enthielt. Das Gefäss kann auf diesem Wege nicht geladen werden. Nun denke man sich aber, dass von aussen durch eine Oeffnung Wasser hineingepumpt werden solle; wie wäre das möglich? Da nach unserer Annahme das Gefäss schon vorher voll war, müsste entweder das Wasser kompressibel sein: in diesem Fall würde die überschüssige Ladung sich gleichmässig durch den eingeschlossenen Raum vertheilen; oder das Gefäss müsste ausdehnbar oder porös sein: dann würde die überschüssige Ladung sich überhaupt nicht innerhalb der Grenzen des ursprünglichen Raumes, sondern ausserhalb desselben befinden. Diejenige überschüssige Menge, die man hineingepumpt hätte, würde sofort auf der Aussenseite erscheinen. Dies ist der Vorgang, den wir bei der Elektricität beobachten. (§ 4.)

Um festzustellen, ob das Wasser wirklich inkompressibel ist, liesse sich folgender Versuch anstellen: In ein Metallgefäss, das mit einem Manometer versehen ist, bringt man einen starken elastischen Beutel und bläst ihn auf, indem man Wasser hineinpumpt. Je stärker der Beutel anschwillt, um so höher steigt der Druck in dem äusseren Gefäss, falls er nicht beständig abgeleitet wird (durch „Erdschluss"). Hat man genug gepumpt, so verschliesst man alle Ritzen, die das Gefäss zufällig haben könnte, liest den Stand des Manometers

genau ab und sticht dann ein Loch in den Beutel. Das Wasser im Beutel wird dadurch plötzlich vom Druck befreit. Ist es nun im Mindesten elastisch, so wird es den Druck in dem äusseren, starren Gefäss erhöhen und das Manometer wird steigen. Ist es aber inkompressibel, so wird das Manometer nichts anzeigen. Dieser Versuch entspricht genau dem Faraday'schen Versuch mit dem Eiseimer und sein Ergebniss lehrt, dass die Elektricität vollständig inkompressibel ist. Der Versuch von Cavendish, bei dem die äussere Hülle eines geladenen Leiters entfernt wird und der Kern sich als völlig ungeladen erweist, ist eine noch schlagendere, aber minder einfache Methode, dasselbe zu beweisen. Wenn durch einen dieser beiden Versuche ein wirkliches, positives Resultat zu erhalten wäre, so hätten wir damit einen Massstab für die Kompressibilität oder Volumenelasticität des Aethers gewonnen. Es würde beweisen, dass longitudinale Stösse (wie diejenigen der Gravitation möglicherweise sind) nicht sofort überall im Raum auftreten, sondern sich mit einer gewissen zeitlichen Geschwindigkeit fortpflanzen.

Es leuchtet ein, dass die oben besprochenen Thatsachen rein technische Ausdrucksweise zur Folge haben, wie z. B. dass die „inducirte Ladung" stets gleich und entgegengesetzt der „inducirenden Ladung" ist. Denn „inducirte Ladung" bedeutet einfach den Zustand der inneren Oberfläche eines Gefässes, in welches eine inducirende Ladung eingeführt worden ist. Weil

hierdurch eine gleiche Menge Elektricität hinausgedrängt wird, so muss die innere Fläche der Wand eine genau entsprechende Menge negativer Elektricität aufweisen.

Wie wir gesehen haben, ist es in den meisten Fällen für uns verständlich, dass die Elektricität in einem geschlossenen Kreise fliesst. Nehmen wir aber einen Fall, wo dies weniger klar ist. Wenn man z. B. eine elektrische Ladung von Ort zu Ort bewegt, indem man sie von aussen in ein Zimmer einführt, so wird sie nicht in dem Zimmer angehäuft und der Aussenwelt entzogen werden; sondern genau dieselbe Menge erscheint sofort ausserhalb des Zimmers. Die Elektricität wird dadurch nicht an einer Stelle des Raumes verdünnt und an einer anderen verdichtet, sondern sie bewegt sich auch in diesem Fall in einem geschlossenen Kreise und verhält sich genau so wie ein inkompressibles Fluidum, das den ganzen Raum erfüllt.

Hieraus ergiebt sich klar die Aequivalenz der Behauptungen, die wir zu Anfang des § 4 aufgestellt haben.

KAPITEL III

LADUNG UND INDUKTION

15. *Kondensatoren.* — Wenden wir uns nun wieder der elektrischen Ladung von Körpern zu und fragen uns: Aus welchem Grunde erhöht eine zur Erde abgeleitete Platte, die man in die Nähe eines Leiters bringt, die Kapacität des Letzteren so bedeutend, dass der gleiche Druck eine weit grössere Menge von Fluidum in ihn hineinzupressen vermag? Wie haben wir uns einen Kondensator oder eine Leydener Flasche vorzustellen?

Auf die einfachste Weise: Wenn wir einem Körper einen mit der Erde verbundenen Leiter nahe bringen, so machen wir *das Dielektricum dünner.*

Für ein dünnwandiges, elastisches Mittel ist selbstverständlich, um es bis zu einem gewissen Grade auszudehnen, weniger Kraft erforderlich, als für eine dicke Wand aus demselben Stoff; mit anderen Worten, ein Hohlraum mit dünnen Wänden besitzt eine grössere Kapacität, als wenn er von dicken Wänden umschlossen

wäre. Die Kapacität eines elastischen Hohlraums kann aber nicht gemessen werden wie die Kapacität eines Eimers, indem man das Maximum der Flüssigkeitsmenge feststellt, die er fasst, wenn er voll ist. Er ist überhaupt erst „voll", wenn er platzt; und die Menge, die ihn zum Platzen bringt, giebt eher einen Massstab für seine Widerstandskraft, als für seine Kapacität. Die einzig rationelle Art, um in diesem Fall die Kapacität eines elastischen Hohlraums zu messen, besteht darin, das Verhältniss festzustellen zwischen jeder Vermehrung seines Inhalts und der Druckerhöhung, die erforderlich ist, um ihn hineinzupressen. Auf diese Art wird denn auch die elektrische „Kapacität" definirt. Eine Leydener Flasche ist wie ein Hohlraum mit sehr dünnen Wänden oder wie ein elastischer Beutel.

Wenn aber die elastische Membran allzu dünn ist oder allzu straff gespannt wird, so zerreisst sie. Diesem Vorgang entspricht das von einem Funken begleitete Durchschlagen bei der Leydener Flasche. Manchmal wird dabei das feste Dielektricum dauernd zerstört. Gewöhnlich zerreisst nur die Luft; da diese aber kein fester Körper ist, so stellt sich die Scheidewand selbstthätig wieder her.

An der Leydener Flasche giebt es viele interessante und wichtige Erscheinungen zu beobachten. Sie lässt sich nicht laden, wenn sie isolirt ist. Denn das Potential der äusseren und inneren Belegung wächst gleich-

mässig; um sie zu laden, muss man jedesmal der äusseren Belegung einen positiven Funken entziehen, wenn man der inneren einen positiven Funken mittheilt; ferner haben wir das Laden und Entladen durch abwechselnde Berührung, wie durch ein hin und her schwingendes Kügelchen, und schliesslich die Erscheinungen der Funkenentladung selbst zu erwähnen.

Im Grunde ist aber, wie wir wissen, *jeder* geladene Körper eine Leydener Flasche; irgendwo muss die äussere Belegung vorhanden sein, sei es nun die Zimmerwand, die Erde oder sonst etwas; und immer besteht eine dielektrische Schicht zwischen der sogenannten inducirten und der inducirenden Ladung. Ein einzelner Körper kann nicht geladen werden. (§ 5.)

16. Um den Vorgang des Ladens zu erläutern, mache ich auf folgende Abbildungen aufmerksam, die das Wesen der Erscheinung zwar weniger vollständig, aber auf einfachere Art darstellen, als hydraulische Modelle.

Wir haben zunächst ein nicht dehnbares endloses Seil, das über Rollen läuft; dieses Seil soll die in einem geschlossenen Kreise fliessende Elektricität darstellen. Die Kräfte, die das Seil bewegen, sind elektromotorische Kräfte und man hat sich zu denken, dass sie entweder vermittelst einer Winde oder vermittelst eines Gewichts beim Haken *W* angreifen. Ein kleines Gewicht würde einem galvanischen Elemente, eine langsame aber

starke Winde würde einer Dynamomaschine entsprechen. Klemmt man das Seil mit der Schraube S fest, so schaltet man einen unendlichen Widerstand ein. Man könnte sich auch statt des Seils, der Klemme und der Winde eine mit Flüssigkeit angefüllte Röhre ohne Ende denken, an der ein Schliesshahn und eine Pumpe angebracht wären;

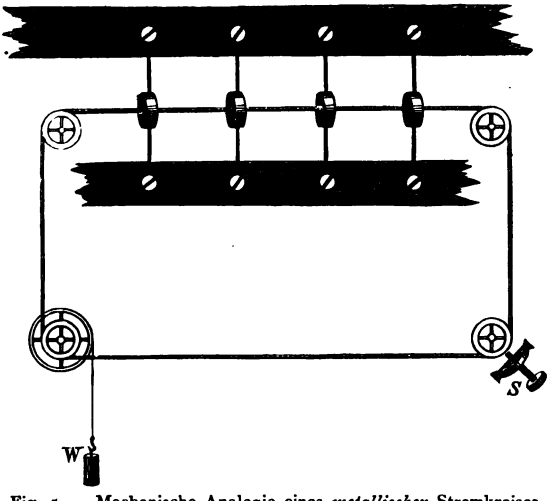


Fig. 5. — Mechanische Analogie eines *metallischen* Stromkreises.

das Seil genügt jedoch für die Mehrzahl der Zwecke und ist viel einfacher. In Fig. 5 bildet Reibung den einzigen Widerstand gegen die Bewegung; das Seil zeigt keine Neigung zurückzuschnellen. Auf dem Seil sitzen kleine oben und unten befestigte Kügelchen, die Atome darstellen sollen; je nachdem sie sich

mehr oder weniger reiben, veranschaulichen sie deren verschiedene specifische Widerstände. Wird das Seil bewegt, so ist Wärme das einzige Ergebniss.

Wenden wir uns nun zu Fig. 6. Die Anordnung ist dieselbe; die Kügelchen sollen aber jetzt so fest an dem Seil haften, dass sie diesem bei seiner Bewegung folgen

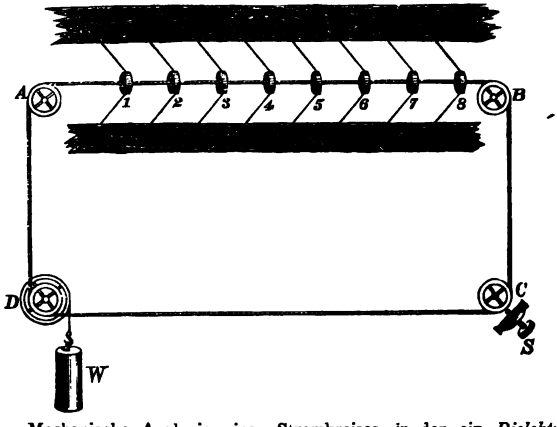


Fig. 6. — Mechanische Analogie eines Stromkreises, in den ein *Dielektricum* eingeschaltet ist, z. B. eines geladenen Kondensators. *A* ist seine positive Belegung, *B* seine negative.

müssen. Sie stellen also Theilchen einer isolirenden Substanz dar. Ihre eigene Befestigung ist jedoch nicht stark genug, um die Bewegung des Seils vollständig zu hindern, sondern sie gestattet noch dasjenige, was Faraday elektrische „*Verrückung*“ [1]) nennt; nicht zu verwechseln mit Leitung. Das heisst, die Kügelchen

[1]) Polarisation des Dielektricums.

lassen sich aus ihrer normalen Lage verrücken, schnellen aber zurück, sobald die störende elektromotorische Kraft aufhört. Die Befestigung der Kügelchen denke man sich hier als aus Gummibändern bestehend. Nimmt man an Stelle des Seils eine geschlossene, mit Wasser gefüllte Röhre an, so werden die Kügelchen und die Gummibänder durch elastische Scheidewände zu ersetzen sein. Die Dehnbarkeit der Gummibänder veranschaulicht die specifische Kapacität des Dielektricums. Je weniger die Bänder nachgeben, desto geringer ist die Kapacität des Mittels; denn offenbar gehört eine grössere elektromotorische Kraft dazu, um eine gegebene Verrückung zu bewirken.

Lässt man eine gegebene elektromotorische Kraft, wie z. B. das Gewicht W, auf das Seil wirken, so findet eine bestimmte Verrückung statt. Die eine Seite A erhält ein längeres Stück Seil als zuvor: d. h. eine positive Ladung; die andere Seite B dagegen verliert ein Stück des Seils: d. h. sie erhält eine negative Ladung. Uebersteigt die elektromotorische Kraft eine gewisse Grenze, so wird die Spannung zu gross. Die Gummibänder zerreissen und dies entspricht einer gewaltsamen Funken-Entladung. Aber es kann auch bei geringerer Spannung vorkommen, dass einige der Gummibänder sich recken und ihre Elasticität einbüssen, sodass bei einigen Kügelchen noch eine allmählige besondere Verrückung eintritt.

Findet jetzt eine Entladung statt, so wird sie

nicht sofort und ganz eintreten, sondern es wird zwar ein grosser Theil der Verrückung sofort aufgehoben werden, der Rest aber wird sich erst allmählich verlieren und die Entladungen des sogenannten Rückstandes verursachen.

Wenn das Dielektricum aus Schichten von verschiedener Widerstandskraft besteht, d. h. wenn einige Kügelchen das Seil weniger festhalten als andere, so zeigt sich die Erscheinung der Rückstandsbildung besonders deutlich.[1])

17. Alle diese Vorgänge sind leicht verständlich und die verschiedenen Stadien werden durch Fig. 7 hinreichend erläutert. Diagramm I zeigt 8 Schichten, die um einen gegebenen Betrag von 3 (willkürlich gewählten) Einheiten aus ihrer normalen Lage verschoben sind. Da die Gegenkraft proportional der Verrückung ist, so beträgt die gesammte Gegenkraft 24. Das Diagramm stellt also eine Leydener Flasche oder ein anderes Dielektricum dar, das sich unter einer Spannung von 24 Einheiten befindet. Nimmt man an, dass jede Schicht vollkommen isolirt, das heisst, dass jedes Kügelchen an dem Seil festhaftet, so tritt keine Veränderung ein, solange diese Spannung andauert. Man kann diesen Zustand auf zwei Arten dauernd erhalten: entweder man lässt das Gewicht W hängen, d. h. man verbindet den Kondensator dauernd

[1]) Ueber die ursprünglichen Einzelheiten dieser Seilmodelle als Erläuterung zu Maxwell's Theorie von der elektrostatischen Induktion etc. siehe Lodge, Phil. Mag. Nov. 1876.

mit der Batterie; oder man erzeugt durch Einklemmen des Seils einen unendlichen Widerstand: d. h. man isolirt die Pole des Kondensators von einander.

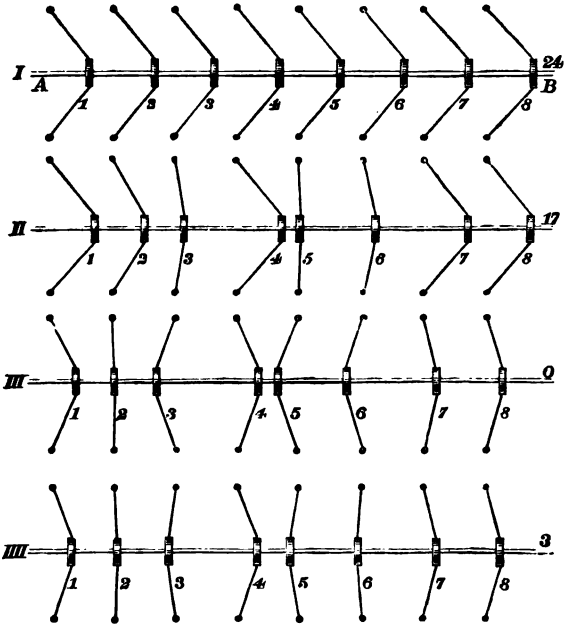


Fig. 7. — Verschiedene Stadien während der Entladung eines geschichteten Kondensators, dessen Schichten zum Theil unvollständig isoliren. Entstehungsweise des Rückstandes und der „inneren Ladungen".

I. zeigt die soeben durch eine elektromotorische Kraft 24 mitgetheilte Ladung.

II. zeigt dieselbe Ladung nach Ablauf einer gewissen Zeit. Sie ist durch partielle innere Verluste auf 17 zurückgegangen und es ist eine innere Ladung erstanden. Der Stromkreis selbst wurde die ganze Zeit hindurch als vollständig isolirend gedacht; die Ladung der Belegungen ist daher konstant geblieben.

III. zeigt die erste Entladung.

IV. zeigt den Zustand nach Ablauf einiger Zeit, nämlich einen Rückstand mit der elektromotorischen Kraft 3 in der ursprünglichen Richtung.

Nun aber denke man sich, dass einige Schichten nicht vollkommen isoliren, und dass einige Kügelchen allmählich wieder in ihre Ruhelage zurückgleiten. Alsdann werden verschiedene Erscheinungen eintreten, je nachdem man das Gewicht hängen lässt oder das Seil einklemmt.

Setzen wir den ersten Fall, bei dem eine dauernde Verbindung mit der Batterie erhalten wird. Angenommen, dass alle Kügelchen gleichmässig zurückgleiten, so erhalten wir einfach eine Fortdauer des Zustandes auf Diagramm I, verbunden mit einem allmählichen Vorwärtsrutschen des Seils, d. h. einem langsamen, aber anhaltenden Stromverlust. Angenommen aber, dass nicht alle Kügelchen gleichmässig zurückgleiten, sondern dass einige haften bleiben, alsdann wird durch das Zurückgleiten einiger Kügelchen die Spannung der übrigen erhöht und das Seil bewegt sich immer langsamer vorwärts, bis schliesslich die isolirenden Schichten die gesammte Spannung zu tragen haben und das Seil sich asymptotisch einer Ruhelage nähert.

Diesen Vorgang beobachtet man bei transatlantischen Kabeln und bei Leydener Flaschen; alle Kondensatoren, mit Ausnahme von Luftkondensatoren, sind ihm unterworfen, und er ist von der Bildung innerer Ladungen begleitet, da, wie ersichtlich, der ursprüngliche normale Abstand zwischen den Kügelchen sich verändert; bei einigen ist er grösser geworden, was einer positiven

Ladung, bei anderen kleiner, was einer negativen Ladung entsprechend ist.

Die Spannung ist sehr ungleich vertheilt, aber ihr Gesammtbetrag bleibt konstant.

Entfernt man nun die elektromotorische Kraft ohne den Stromkreis zu unterbrechen, d. h. schliesst man den Kondensator kurz, so erfolgt zuerst eine rasche Entladung und dann ein langsamer Ausgleich, d. h. eine umgekehrte Bewegung des Seils, das von den noch etwas verschoben gebliebenen, isolirenden Schichten durch die nunmehr im entgegengesetzten Sinne verschobenen, schlecht leitenden Schichten hindurchbewegt wird; die Zeit, die der Rückstand braucht, um zu verschwinden, entspricht der Zeit, die er braucht, um zu entstehen.

Es ist wichtig, sich klar zu machen, dass diese Erscheinungen vollständig vereinbar sind mit der Inkompressibilität der Elektricität, d. h. mit der Unausdehnbarkeit des Seils. Die gewöhnliche Vorstellung, nach der die positive und negative Ladung einer Leydener Flasche im Glase einander entgegenkriechen und wieder herauskriechen, ist absolut falsch, und der wahre Vorgang, der ganz dieselbe Wirkung hervorbringt wie dieser scheinbare, ist vollkommen klar.

Bisher gingen wir davon aus, dass der Kondensator in dauernder Verbindung mit der Batterie blieb. Setzen wir nun den Fall, dass die Pole des Kondensators von einander isolirt werden. Hat man das Dielektricum in den auf Diagramm I dargestellten Zustand versetzt, so

klemme man das Seil fest und warte. Wenn einige Kügelchen zurückgleiten, während andere haften, so wird sehr bald der auf Diagramm II dargestellte Zustand eintreten. Hier sind die Kügelchen Nr. 3, 5 und 6 theilweise zurückgerutscht und die Gesammtspannung des Seils ist auf 17 zurückgegangen. Die Flasche hat sich durch innere Verluste zum Theil entladen, ohne dass sich das Seil im Mindesten bewegt hätte. Es sind innere Ladungen entstanden und zwar positive zwischen 3 und 4 und zwischen 5 und 6, negative zwischen 2 und 3 und zwischen 4 und 5. Die Ladungen auf den Belegungen *A* und *B* sind konstant geblieben; die Flasche hat offenbar an Kapacität zugenommen, da dieselbe Ladung durch eine geringere elektromotorische Kraft aufrecht erhalten wird. Diese Wirkungen scheinen sämmtlich auf den ersten Blick unvereinbar mit dem Verhalten eines inkompressibelen Fluidums; unser Diagramm aber beweist deutlich das Gegentheil.

Nun löse man vorübergehend die Klemme, die das Seil festhält; d. h. man entlade den Kondensator und isolire von Neuem. Im Augenblick der Entladung findet ein Erguss von Elektricität statt und die Kraft fällt auf Null. Diagramm III zeigt den Zustand der entladenen Flasche unmittelbar nach der Entladung. Die äusseren Ladungen sind noch nicht ganz verschwunden, die inneren Ladungen wurden nicht beeinflusst; keine einzige Schicht befindet sich in der Ruhelage. Die isolirenden Schichten bewahren noch etwas von ihrer ursprünglichen Ver-

rückung und die durchlässigsten sind im umgekehrten Sinne verschoben, sodass die resultirende Kraft grade Null beträgt. Die durchlässigste Schicht Nr. 5 ist am stärksten im umgekehrten Sinne verschoben. Dieser Zustand währt aber nicht lange. Die Schichten fangen gleich wieder an zurückzurutschen und gelangen binnen Kurzem in den Zustand, den man auf Diagramm IV sieht, wo die nunmehr fast völlig frei gewordene Spannung der isolirenden Schichten auf das Seil eine Kraft 3 in der ursprünglichen Richtung ausübt. Diese Kraft nennt man den elektrischen Rückstand, und wenn man das Seil losklemmt, erhält man die erste Rückstands-Entladung. Noch immer aber ist die Flasche nicht ganz entladen. Nach einiger Zeit erscheint ein zweiter, schwächerer Rückstand und so fort, fast in's Unbegrenzte, bis die Summe aller Rückstands-Entladungen sammt der ursprünglichen ersten Entladung genau der anfangs der Flasche mitgetheilten Ladung entspricht — sofern nämlich überhaupt irgend eine Schicht undurchlässig war. Wenn alle mehr oder weniger durchlässig waren, so wird selbstverständlich ein Verlust eintreten.

18. Bei der Betrachtung dieser mechanischen Analogie muss man sich aber vor der Vorstellung hüten, dass die elektrische Verrückung von irgend einer mechanischen Verrückung der Stofftheilchen begleitet werde. Augenscheinlich kann ein Modell mit unbeweglichen, zur Befestigung der Kügelchen dienenden

Leisten nicht sehr genau den elektrischen Erscheinungen entsprechen. Wollte man den Vorgang genauer nachbilden, so müsste man sich mehrere Reihen von Kügelchen denken. Jede Reihe für sich müsste auf ein Seil aufgezogen und mit quergespannten Gummibändern befestigt sein wie auf Fig. 7 a.

Würden nun diese Seile gleichzeitig und abwechselnd in entgegengesetzten Richtungen verschoben und dächte man sich, dass die Seile abwechselnd positive und negative Elektricität, die Kügelchen elektropositive

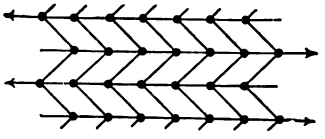


Fig. 7 a. — Siehe auch Fig. 46.

und elektronegative Stofftheilchen darstellten, so würde vielleicht eine genauere Analogie des wirklichen Vorgangs zu Stande kommen. Es fände keine Verrückung der ganzen Molekel statt, wohl aber eine Verrückung ihrer atomistischen Bestandtheile und es würde eine scherende Spannung auf jede Molekel ausgeübt, die, wenn sie stark genug wäre, eine elektrolytische Zersetzung herbeiführen könnte. Ich betrachte jedenfalls jede von einem Durchschlagen begleitete Entladung als eine Art von Elektrolyse. (§§ 112 u. 65 a; siehe auch § 13.)

19. Kehren wir aber zurück zur einfachen Entladung und betrachten wir diesen Vorgang näher. Ist der Widerstand des Stromkreises sehr stark, so werden die Kügelchen einfach in ihre Ruhelage zurückgleiten. Ist aber das Seil ziemlich frei, so werden sie über ihr Ziel hinausschiessen, wieder zurückprallen und sich erst nach einer Reihe von raschen Schwingungen in ihre natürliche Lage begeben. Diesem Vorgang entspricht die Thatsache, dass sich die Entladung der Leydener Flasche meist unter Oscillationen vollzieht. Der scheinbar einheitliche, momentane Funken löst sich bei genauerer Untersuchung mittelst eines sehr rasch rotirenden Spiegels in eine Reihe schnell auf einander folgender Blitze auf, die zusammen ungefähr $^1/_{100\,000}$ Sekunde dauern. Diese oscillirenden Ströme wurden vorausgesagt und berechnet von Sir W. Thomson; sie wurden zuerst von Feddersen durch den Versuch nachgewiesen. Diese Schwingungen dauern fort, bis die gesammte in dem gespannten Mittel aufgespeicherte Energie sich in Wärme umgesetzt hat. Das Vorhandensein dieser Schwingungen beweist deutlich, dass Elektricität in Verbindung mit Materie Beharrungsvermögen besitzt. Die Geschwindigkeit dieser Schwingungen ist ganz ausserordentlich gross; sie schwankt zwischen 10 Tausend und 100 Millionen Schwingungen in der Sekunde, je nach der Kapacität und der Selbstinduktion des Stromkreises.

Die Geschwindigkeit der Schwingungen und die

Schnelligkeit ihres Erlöschens, ferner die Umstände, welche eine oscillirende Entladung in eine nur nach einer Richtung sich vollziehende verwandeln können, entsprechen genau den Erscheinungen bei einer zusammengedrückten Sprungfeder, welche plötzlich zurückschnellt. Befindet sich die Feder in einem sehr zähen Mittel oder besitzt sie nur wenig Beharrungsvermögen, so wird sie nicht schwingen, sondern einfach in ihre Ruhelage zurückkehren. Unter gewöhnlichen

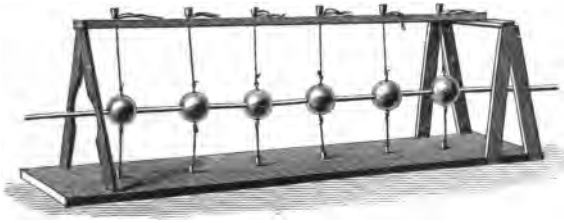


Fig. 8. — Modell eines Dielektricums.

Umständen aber wird sie eine Reihe von Schwingungen ausführen, bis sich ihre gesammte Energie in Wärme umgesetzt hat. (§§ 123 u. ff.)

Fig. 8 zeigt das Modell eines Dielektricums.

20. Soll eine *Ladung durch Influenz* veranschaulicht werden, so braucht man nur einen Leiter in das polarisirte Dielektricum einzuführen, oder, mit anderen Worten, einige der Kügelchen mit starren Fäden zu versehen und durchlässig (leitend) zu machen, während die übrigen Kügelchen elastische Bänder haben und haftend (isoli-

rend) sind. Findet dann eine Verrückung statt, so wird offenbar auf der einen Seite der Metallschicht das Seil verkürzt, auf der anderen Seite verlängert werden, wie bei Fig. 9. Dieser Vorgang entspricht genau den gleichen entgegengesetzten inducirten Ladungen bei einem der Influenz unterworfenen Leiter. (Siehe Fig. 3.)

Wird die Spannung auf der einen Seite aufgehoben, indem man die Kügelchen zurückgleiten lässt, so entspricht dies einer vorübergehenden Ableitung

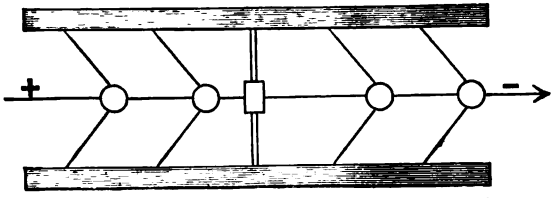


Fig. 9. — Metallschicht, in ein polarisirtes Dielektricum eingeführt, mit entgegengesetzten inducirten Ladungen auf beiden Oberflächen. (Vergl. Fig. 3.)

des Leiters zur Erde, wie auf Fig. 4. Die andere Seite hat nun die gesammte elektromotorische Kraft auszuhalten; Spannung und Ladung werden sich deshalb auf dieser Seite vermehren. Wird nun die wirksame elektromotorische Kraft entfernt, so erscheint die negative Ladung entweder in gleicher Stärke auf beiden Seiten der Metallschicht, oder stärker auf der Seite, welche die wenigsten Kügelchen aufweist, d. h. welche anderen Leitern am nächsten ist.

21. Da es erwünscht ist, diese Dinge gründlich zu

verstehen, so lassen wir auf Fig. 9a eine Reihe von Abbildungen der verschiedenen Stadien dieses Vorganges folgen.

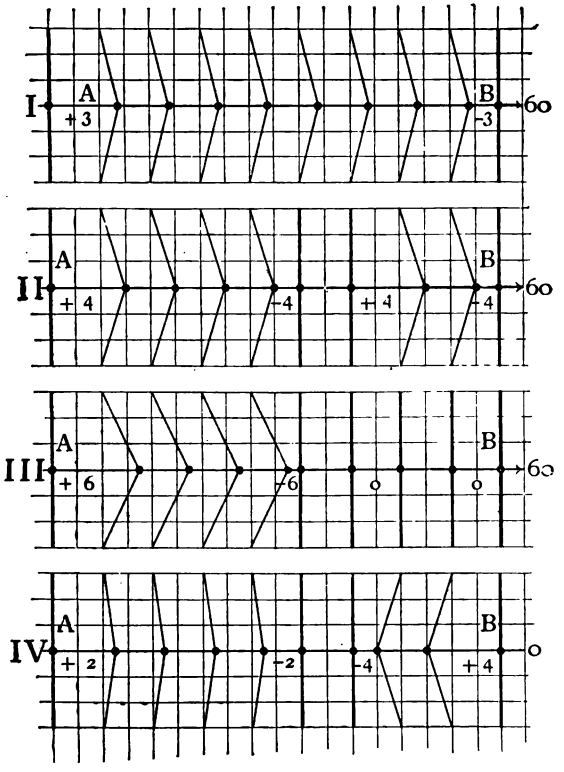


Fig. 9a. — Verschiedene Stadien beim Laden eines Metalls durch Influenz und Berührung. Die Ziffern hinter + und — bedeuten die Ladungen; die Ziffern bei den Pfeilspitzen bedeuten die elektromotorische Kraft. Bei dieser Serie ist die elektromotorische Kraft als konstant gedacht. Will man den anderen Fall darstellen, bei dem die Ladung auf Platte *A* konstant erhalten wird, so muss man das Seil festlegen; dann wird aber die darauf einwirkende Kraft abnehmen und zwar von 60 (I) auf 45 (II) bis zu 30 (III).

Diagramm I zeigt ein gewöhnliches polarisirtes Dielektricum, z. B. Luft, zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Körpern *A* und *B*, deren Potentialdifferenz konstant erhalten wird. Der Einfachheit wegen denken wir uns das Feld gleichmässig, d. h. mit geraden, parallel verlaufenden Kraftlinien, sodass *A* als eine grosse positiv geladene Platte, *B* als eine ihr gegenüberstehende Erdplatte gelten können. Den Unterschied des Potentials zwischen *A* und *B* wollen wir 60 nennen. Er ist vertheilt unter 8 Schichten oder Dickeneinheiten, von denen mithin jede die Spannung $7\frac{1}{2}$ erleidet und $\frac{3}{4}$ von der Breite eines Quadrats aus der Ruhelage verschoben wird. Die Ladungen auf *A* und *B* betragen $\pm$ 3.

Eine isolirte, zwei Einheiten starke Metallscheibe wird nun eingeführt und tritt an die Stelle von zwei dielektrischen Schichten. (Siehe Diagramm II.) Daher erhält jede der übrigen 6 Schichten eine stärkere Spannung 10, und jede Schicht wird nunmehr um ein ganzes Quadrat verschoben. Die Ladung der Platten *A* und *B* steigt auf $\pm$ 4 und die Wirkung ist dieselbe, als ob die Dicke des Dielektricums im Verhältniss von 8 zu 6 vermindert worden wäre. Die Oberflächen der eingeführten Metallscheibe sind ebenfalls geladen und zwar beträgt die Ladung auf der *A* gegenüberliegenden Seite $-$ 4, auf der *B* gegenüberliegenden Seite $+$ 4.

Auf Diagramm III wurde die Metallscheibe vorübergehend zur Erde abgeleitet. Dadurch ist die Spannung der Seite *B* vollständig aufgehoben; denn an Stelle des Di-

elektricums ist Metall getreten, das dem Seil freien Durchgang gestattet. Das Seil schnellt vorwärts und die gesammte Spannung vertheilt sich auf 4 Schichten, die nun jede 15 Spannungseinheiten aushalten müssen und um $1^1/_2$ Quadrate aus ihrer Ruhelage verschoben sind. Stellt man das Dielektricum wieder her (d. h. hebt man die vorübergehende Verbindung mit der Erde wieder auf), so tritt keine weitere Veränderung ein. Die Ladung auf der einen Seite der Metallscheibe beträgt jetzt — 6, die auf der anderen Seite Null.

Zum Schluss entferne man die konstante elektromotorische Kraft, welche die ganze Zeit eingewirkt hat. Alsdann schnellt das Seil zurück, die resultirende Kraft wird Null. Die 2 Schichten auf der rechten Seite müssen den 4 Schichten auf der linken Seite das Gleichgewicht halten, erstere sind daher um ein ganzes, letztere um ein halbes Quadrat verschoben. Die Scheibe ist auf beiden Oberflächen negativ geladen, rechts — 4, links — 2. Die Ladungen auf A und B betragen + 2 und + 4, obgleich ihr Potential gleich ist. Dieser Zustand ist abgebildet auf Diagramm IV; dabei war also die Metallscheibe durch Influenz negativ geladen. Die Ladung *könnte* auch auf beiden Seiten gleich gross sein; dies ist aber nicht nothwendig, sondern hängt ab von der relativen Nähe benachbarter Gegenstände wie A und B.

Wenn A, statt bei konstantem Potential erhalten zu werden, eine konstante Ladung erhielte, so würden die Vorgänge sich begreiflicherweise etwas anders gestalten.

Die resultirende Spannung am Seil würde abnehmen, sowohl wenn man die Metallscheibe einführt, als auch wenn man sie zur Erde ableitet; alsdann aber wären die Erscheinungen genau diejenigen des Elektrophors, Erscheinungen, die sich beständig in allen Influenzmaschinen abspielen. Es verlohnt daher der Mühe, auf die Vorgänge am Elektrophor näher einzugehen; man wird sich alsdann ein deutliches Bild davon machen können, was in jedem gegebenen Falle vorgeht.

Der Elektrophor.

22. Diagramm I, Fig. 9b, zeigt den negativ elektrisirten Kuchen auf seiner Unterlage ruhend. Die negative Ladung auf der Oberfläche des Kuchens beträgt 13 Einheiten; davon sind 12 durch die Unterlage „gebunden", wie man sich ausdrückt; eine ist frei. Mit anderen Worten, die Spannung von 12 Ladungseinheiten entfällt auf die Schichten des Kuchens, der kleine Rest auf die Atmosphäre darüber. Die Spannung in der Luft ist gering, weil diese viel dicker ist, als der Kuchen und so viele Schichten hat, dass eine sehr geringe Verrückung jeder Schicht genügt, um dem Zug auf das Seil das Gleichgewicht zu halten. Eine durch den elektrisirten Kuchen inducirte Ladungseinheit befindet sich an der Zimmerwand oder Decke. Nun setzt man den Metalldeckel isolirt auf den Elektrophor. Ist der Deckel

von messbarer Dicke, so verschiebt er einige der gespannten Schichten und die Spannung der Uebrigen wird dadurch um ein Geringes erhöht; diese Wirkung

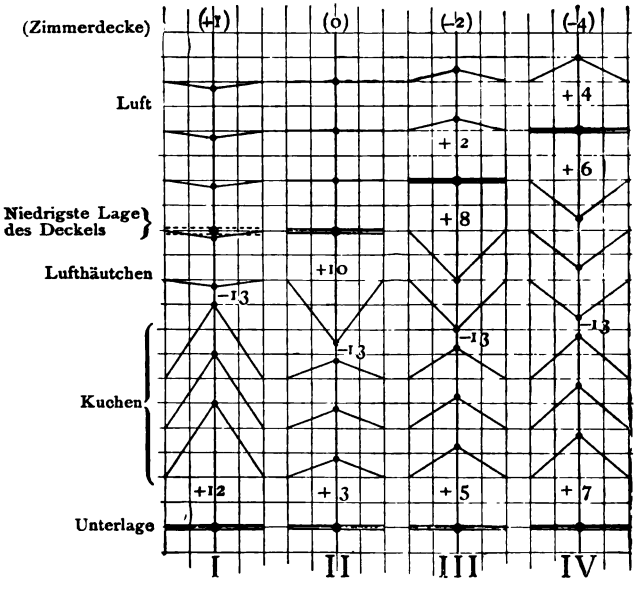


Fig. 9b. — Vorgänge am Elektrophor. Die doppelten Linien bezeichnen feste Stäbe, an denen gleitende Kügelchen befestigt sind und bedeuten Metall. Die haftenden Kugeln, die mit Gummibändern befestigt sind, bedeuten das Dielektricum. Ziffern hinter + oder — bedeuten Ladungen. Die Ladung auf der Oberfläche des Kuchens ist konstant. Die Unterlage soll mit der Erde und den Zimmerwänden verbunden sein. Die eingeklammerten Zahlen oben bedeuten die inducirte Ladung auf Zimmerdecke und Wänden. Die Luftschicht ist nicht in ihrer ganzen Ausdehnung dargestellt; sie muss dick genug sein, um auf Diagramm I der Spannung im Kuchen genau das Gleichgewicht zu halten. Die resultirende Spannung am Seil beträgt in allen Fällen Null.

I. Der Kuchen ist geladen und der Deckel entweder abgehoben, oder, wenn er aufliegt, isolirt.

II. Deckel und Unterlage sind verbunden worden.

III u. IV. Der Deckel wird allmählich entfernt.

Das gänzliche Entfernen und Entladen des Deckels führt wieder zu Zustand I.

ist aber sehr schwach und ganz unwesentlich. Wir nehmen daher an, dass der Deckel keine Dicke habe und bringen ihn in die Lage, die auf dem Diagramm als die niedrigste bezeichnet ist. Die Spannung geht durch ihn hindurch und es verändert sich nichts, mit Ausnahme der Schicht, deren Stelle der Deckel eingenommen hat. Die punktirten Linien auf Diagramm I zeigen den Deckel in dieser Lage, während er noch isolirt ist. Er berührt den Kuchen nicht unmittelbar; denn zwischen ihm und der negativ geladenen Oberfläche befindet sich, wie die Abbildung zeigt, ein Häutchen von Luft oder von der Substanz, woraus der Kuchen besteht.

Nunmehr verbindet man den Deckel mit der Unterlage. Sofort tritt der Zustand ein, den man auf Diagramm II sieht.

Eine Ladung von 9 Einheiten geht von der Unterlage auf den Deckel über und verbindet sich mit der zuvor auf der Wand befindlich gewesenen Ladung 1 zu einer Gesammtsumme von 10.[1]) Die Spannung der Atmosphäre über dem Deckel ist vollständig aufgehoben und die ganze Erregung geht nunmehr inwendig zwischen Deckel und Unterlage vor sich. Die Spannung des

[1]) Wäre die Unterlage isolirt und vollzöge sich die Verbindung zwischen Deckel und Unterlage gleichfalls unter Isolirung, so würde die Einheit auf der Zimmerwand bleiben; der Deckel würde dann nur eine Ladung 9 erhalten und die schwache Spannung der Atmosphäre darüber, die auf Diagramm I dargestellt ist, würde unverändert fortbestehen.

Kuchens hat bedeutend nachgelassen, und die Arbeit, dem übrigbleibenden Rest das Gleichgewicht zu halten, hat nun die sehr dünne Schicht zwischen Deckel und Oberfläche des Kuchens zu leisten. Dieses Häutchen befindet sich daher in starker Spannung.

Jetzt hebt man den wiederum isolirten Deckel ab. Je mehr wir ihn heben, deso mehr neue dielektrische Schichten treten zwischen ihn und den Kuchen und übernehmen einen Theil der Spannung. Dies hat dreierlei Folgen. Erstens entlasten sie die ausserordentlich dünne Schicht; zweitens vermehren sie die Spannung in dem Kuchen; und drittens erzeugen sie eine kleine Spannung in der Luft oberhalb des abgehobenen Deckels. Die Unterlage erhält daher 5 statt 3 Einheiten; der Deckel behält zwar die Ladung 10; ein Theil derselben befindet sich aber auf seiner Oberseite und eine inducirte Ladung — 2 erscheint an der Zimmerwand. Diagramm III zeigt diesen Zustand.

Auf Diagramm IV ist der Deckel noch höher gehoben. Schliesslich weisen, bei unendlich weiter Entfernung von dem Kuchen, seine Ober- und Unterseite die gleiche Ladung auf, nämlich 5, und der Kuchen nebst Deckel sind in ihren Anfangszustand zurückgekehrt. Da der Deckel jetzt die Ladung 10 enthält, so wird die Zimmerwand, wo immer der Deckel sich befindet, die Ladung — 10 enthalten und der Deckel kann ganz nach Belieben entladen werden, ohne dass der Kuchen dadurch beeinflusst würde. Ist die Entladung erfolgt, so kann man den Deckel

wieder aufsetzen, wie auf Diagramm I, und damit den Kreislauf der Erscheinungen wiederholen.

Setzt man den Deckel vor erfolgter Entladung wieder auf, so vollzieht sich derselbe Kreislauf in umgekehrter Reihenfolge von IV bis II.

Stellt man einen Elektrophor auf einen Isolirschemel und verbindet seine Unterlage durch ein empfindliches Galvanometer mit der Erde, so kann man das Ausströmen der Elektricität leicht beobachten, je nachdem der Deckel berührt oder abgehoben wird.

23. Noch eine andere Erscheinung von hoher Wichtigkeit erheischt eine erläuternde Darstellung, um klar verständlich zu werden. Es ist dies die Wirkung, welche eintritt, wenn in ein polarisirtes Mittel statt der Metallscheibe irgend ein anderes, vollständig isolirendes Dielektricum, das aber andere induktive Kapacität besitzt, eingeführt wird. Man lege z. B. eine dicke Glasscheibe zwischen die Platten eines geschichteten Kondensators. Die Wirkungen gestalten sich verschieden, je nachdem die Platten des Kondensators mit einer gegebenen Menge geladen, oder auf konstanter Potentialdifferenz erhalten werden.

Man betrachte Fig. 9c. Wir nehmen an, dass die 8 gleichartigen Schichten durch eine elektromotorische Kraft 24 verschoben sind; die Spannung in dem Seil (negatives elektrisches Potential) steigt daher bei jeder Schicht um eine Stufe 3. Diagramm I zeigt dieses Anfangsstadium. Man klemme nun das Seil fest, d. h. man

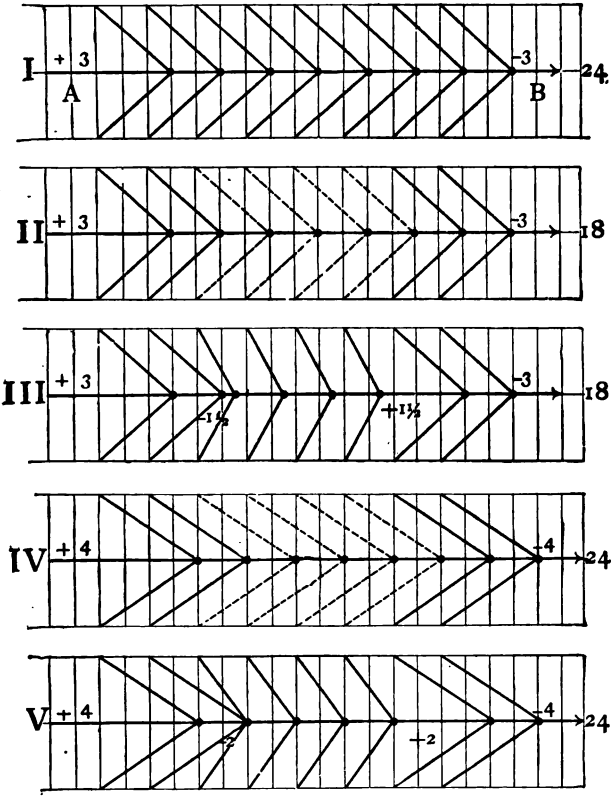


Fig. 9c. — Wahre und scheinbare Wirkung der Einführung einer Glasscheibe zwischen die Platten eines Kondensators.

I. Kondensator mit einer Kapacität von $^1/_8$.

II. Einführung einer Glasscheibe, die halb so dick ist, wie das Dielektricum und deren specifische induktive Kapacität 2 beträgt. Die Ladung wird konstant erhalten. Die Kapacität steigt auf $^1/_8$.

III. Täuschende Nachahmung dieser Erscheinung mit Hülfe von Oberflächenladungen ohne Veränderung der induktiven Kapacität.

IV. Einführung der Glasscheibe in einen Kondensator, der mit einer konstanten elektromotorischen Kraft versehen ist. Die Kapacität sinkt wieder auf $^1/_8$.

V. Nachahmung dieser Erscheinung mit Hülfe von Oberflächenladungen.

ertheile den beiden Platten A und B eine konstante Ladung. Dann führe man eine Glasscheibe ein, mit anderen Worten, man ersetze die 4 mittleren Schichten durch Gummilagen, die nur halb so steif sind. (Siehe II.) Die Spannung in dem Seil steigt nun bei jeder dieser Schichten nur um $1^1/_2$ und die Gesammtdifferenz des Potentials beträgt jetzt statt 24 nur 18. Die Ladungen bleiben inzwischen konstant und die Oberflächen der Glasscheibe sind nicht geladen; die Kapacität des Kondensators ist also im Verhältniss von 4 zu 3 gestiegen.

Obgleich die Oberflächen der Glasscheibe nicht geladen sind, so ist die Wirkung doch fast dieselbe, als ob sie es wären. Das Seil verhält sich genau so, als ob die neuen Gummibänder noch die Widerstandskraft der früheren besässen, die daran befestigten Kügelchen aber halbwegs zurückgerutscht wären und sich in der Lage befänden, die auf Diagramm III veranschaulicht ist. Hier sind die Oberflächen geladen, wie die Ziffern angeben. Dieser Zustand ist, wie gesagt, nicht der durch die Glasscheibe hervorgerufene, er sieht ihm aber zum Verwechseln ähnlich. Man versteht daher unter unechten oder virtuellen Ladungen auf der Oberfläche von Glasscheiben solche Ladungen, wie die auf Diagramm III veranschaulichten, welche die Wirkung von Diagramm II täuschend wiedergeben.

So viel von der Wirkung einer konstanten Ladung; setzen wir nun den Fall eines konstanten Potentials.

Diagramm IV zeigt die Wirkung, die eintritt, wenn in diesem Fall einige Gummibänder durch schwächere ersetzt werden. Die elektromotorische Kraft bleibt konstant, also entfällt auf die steifen Gummibänder eine stärkere Spannung als zuvor; innere Ladungen können nicht entstehen, solange die Substanzen vollständig isoliren, also werden alle Kügelchen gleichmässig vorwärtsgezogen. Die Spannung beträgt jetzt bei den steifen Schichten (Luft) 4 Einheiten und bei den schwächeren Schichten (Glas) 2; im Ganzen beträgt also die elektromotorische Kraft 24. Die Ladung der Platten A und B ist in Uebereinstimmung mit der Zunahme an Kapacität von ± 3 auf ± 4 gestiegen; das Verhältniss, in dem die Kapacität zunimmt, beträgt noch immer 4 zu 3. Auch hier lässt sich die eigentliche Wirkung, die Diagramm IV veranschaulicht, durch unechte Ladungen der Oberflächen ohne Veränderung der inductiven Kapacität nachahmen, wie Diagramm V zeigt, auf dem alle Gummibänder von gleicher Stärke gedacht sind.

24. *Hydraulisches Modell der Leydener Flasche.* Nächst dem Seilmodell wollen wir nun ein hydraulisches Modell betrachten, das dieselbe Reihe von Erscheinungen zum Theil sogar noch deutlicher und unmittelbarer erläutert. Da der Vorgang des Ladens stets so verläuft wie bei der Leydener Flasche, so wollen wir uns eine solche denken und sofort ihr hydrostatisches Ebenbild entwerfen.

Man denke sich also eine Leydener Flasche, die für unsere Zwecke am besten horizontal auf einem isolirten Fuss befestigt wird. Ihre Belegungen seien mit Elektroskopen aus Markkügelchen versehen. Ich selbst nehme zur Veranschaulichung des hydrodynamischen

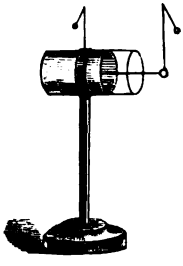


Fig. 9d.

Modells noch lieber eine vertical aufgestellte Franklinsche Tafel und verbinde deren Belegungen je mit einem Markkügelchen. Leider können die Elektroskope nicht die Verschiedenheit zwischen negativem und positivem Potential anzeigen.

Um nun das hydraulische Modell eines solchen Apparats herzustellen, nehme man eine jener Gummiblasen, die, mit Gas gefüllt, als Kinderspielzeug verkauft werden, binde diese über die Mündung einer Röhre, die mit einem Hahn *A* versehen ist, und führe die Röhre durch einen Kork in ein dreihalsiges, kugelförmiges Glasgefäss ein. Siehe Fig. 10. Die zweite Oeffnung dieses Gefässes enthält eine zweite Röhre

mit einem Hahn *B*; die dritte Oeffnung wird verschlossen, sobald das ganze Gefäss, sowohl innerhalb wie ausserhalb der Gummiblase, vollständig mit Wasser ohne Luftblasen angefüllt ist.

Dieser Apparat stellt dann eine isolirte Leydener Flasche dar; die Gummiblase ist das Dielektricum

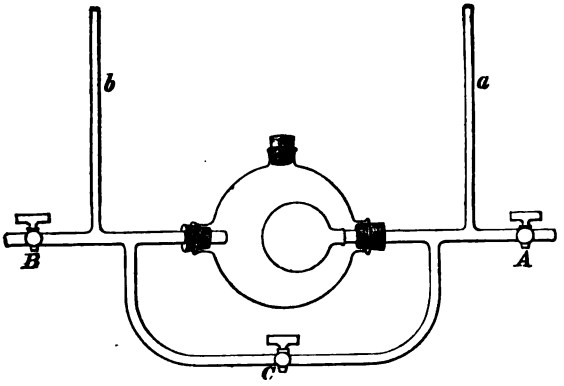


Fig. 10. — Schematisirtes, hydraulisches Modell einer Leydener Flasche.

und die mit Wasser gefüllten Räume sind die innere und äussere Belegung.

Zwei offene Manometer *a* und *b*, die in die Röhren *A* und *B* eingeführt werden, entsprechen den Elektroskopen, mit denen die Leydener Flasche verbunden ist. Eine dritte gebogene Röhre *C*, welche die innere und äussere Belegung verbindet, bildet den Entlader. Für gewöhnlich jedoch bleibt *C* natürlich geschlossen.

Eine an *A* angeschraubte Wasserpumpe stellt die mit der inneren Belegung verbundene Elektrisirmaschine dar. Die äussere Belegung *B* mündet in einen Wasserbehälter, welcher der Erde entspricht. Aus demselben Behälter entnimmt natürlich die Pumpe ihr Wasser.

Solange die Gummiblase ihre normale Ausdehnung behält und das Ganze mit Wasser ohne Luftblasen vollständig erfüllt ist, wird das Niveau des Wassers in den beiden Manometern genau so hoch sein wie in dem Behälter; das heisst das ganze System hat das Potential Null oder das Potential der Erde.

Nun schliesse man *C* und *B*, öffne *A* und fange an zu pumpen. Sofort beginnt das Wasser in den beiden Manometern stark und gleichmässig zu steigen. Mit anderen Worten: man versucht eine isolirte Flasche zu laden. Man drehe die mit einer wirklichen Leydener Flasche verbundene Elektrisirmaschine und man wird sehen, dass ihre beiden Markkügelchen in genau derselben Weise gleichmässig steigen.

Nun öffne man *B* für einen Augenblick; der Druck lässt nach und beide Manometer fallen sofort scheinbar auf Null. Wiederholt man aber den Vorgang mehrere Male, so stellt sich heraus, dass *b* stets auf Null fällt, *a* jedoch jedesmal um eine grössere Strecke zurückbleibt und dass die Gummiblase sich allmählich ausdehnt. Dies entspricht dem Vorgang des Ladens durch *abwechselnde* Berührung. Man kann ihn genau in der-

selben Weise an der wirklichen Flasche wiederholen; der inneren Belegung wird jedesmal ein Funken mitgetheilt, und der äusseren Belegung ein ebensolcher Funken entzogen; unterlässt man dies, so kann die Flasche nicht geladen werden, weil Wasser (und Elektricität) inkompressibel ist. (§ 14 A.)

Bleibt *B* dauernd offen stehen, so kann man weiter pumpen, bis sich die Gummiblase ganz ausdehnt und das Manometer *a* zu seiner vollen Höhe steigt; *b* wird, bis auf einige Schwankungen, die ganze Zeit auf Null stehen bleiben.

Ist die Flasche geladen, so verschliesse man *A*, entferne die Pumpe und verbinde das Ende von *A* unmittelbar mit dem Behälter.

Nun kann man selbstverständlich vermittelst des Entladers *C* die Flüssigkeit von der inneren nach der äusseren Belegung hinüberleiten, die Spannung aufheben und in beiden Manometern das gleiche Niveau herstellen. Geschieht dies aber, während die Flasche isolirt ist, das heisst während *A* und *B* verschlossen sind, so wird das gemeinsame Niveau der Manometer nach der Entladung nicht auf Null fallen, sondern halben Weges darüber stehen bleiben. Dasselbe beobachtet man bei der Leydener Flasche, wenn sie auf gewöhnliche Art geladen, isolirt, entladen und dann berührt wird.

Statt uns des Entladers *C* zu bedienen, können wir die Entladung auch durch abwechselnde Berüh-

rung vornehmen. Dieser Vorgang ist ungemein lehrreich.

Man beginne, wenn Manometer *b* auf Null und Manometer *a* unter hohem Druck steht. Man öffne den Hahn *A*; es wird etwas Wasser aus der inneren Belegung herausgepresst und Manometer *a* fällt auf Null; während aber die Gummiblase zusammenschrumpft, zieht sie das Wasser in die äussere Glasklugel und saugt daher das Manometer bis unter Null herab; dabei fallen beide Manometer ziemlich um demselben Betrag.

Nun schliesse man *A* und öffne *B*; alsdann tritt etwas Wasser aus dem Behälter herein, verringert die Spannung der Gummiblase und beide Manometer steigen; *b* bis Null, *a* beinahe bis zu seiner ursprünglichen Höhe.

Nun schliesse man *B* und öffne *A* nochmals; wieder fallen die beiden Manometer. Kehrt man die Hahnstellung um, so steigen sie wieder. Dieses wiederholt man so lange, bis die Blase ihren normalen Umfang wiedererlangt hat. Auf solche Weise entladet man durch abwechselnde Berührung und erhält ein genaues Bild von den Vorgängen bei abwechselnder Ableitung der äusseren und inneren Belegungen zur Erde. Die Markkügelchen steigen abwechselnd unter der Einwirkung positiver und negativer Elektricität und bezeichnen die Potentiale über und unter Null.

Die Figuren 11 und 12 sind Abbildungen von Apparaten, die ich eigens für diesen Zweck bauen

liess. Das kugelförmige Glasgefäss mit der darin eingeschlossenen, halbaufgeblähten Gummiblase, die Pumpe, der Wasserbehälter, die Manometer *a* und *b*, die Hähne *A B C* sind leicht zu erkennen.

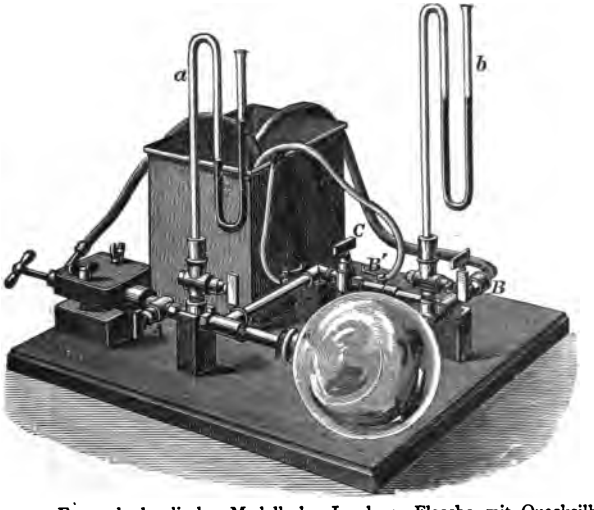


Fig. 11. — Erstes hydraulisches Modell der Leydener Flasche mit Quecksilbermanometern als Elektroskopen. Die Glaskugel enthält eine Gummiblase, die anschwillt, wenn sie vollgepumpt wird. Das Niveau des Wassers in dem grossen Behälter stellt das Erdpotential dar. Biegsame mit Wasser angefüllte Schläuche vermitteln, wenn erwünscht, die Ableitung zur Erde. Die Manometer *a* und *b* bilden die mit je einer Belegung verbundenen Elektroskope.

Hinzugefügt sind noch zwei besondere Hähne *A'* und *B'*, die sich unmittelbar in den Behälter öffnen und uns der Mühe überheben, die Pumpe auszuschalten und *A* direkt zu verbinden, wenn wir Entladung durch abwechselnde Berührung darstellen wollen. Die Höhe des

Behälters auf Fig. 12 genügte nicht; ich erhöhte ihn später um das Doppelte. Die ganze Höhe der Manometer ist nicht dargestellt.

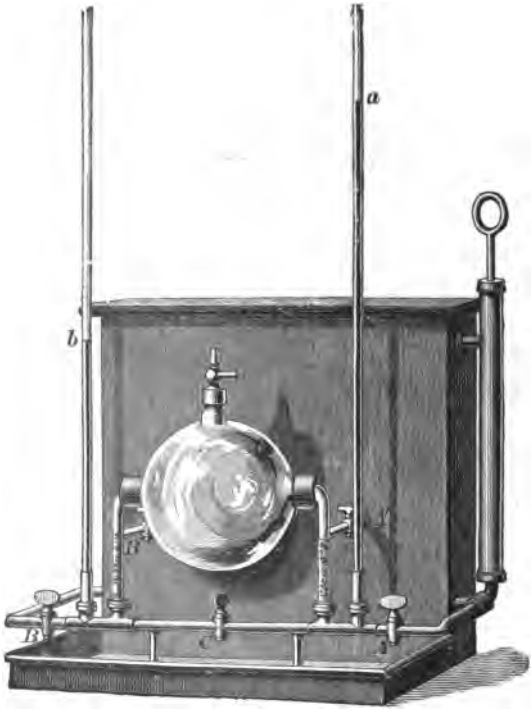


Fig. 12. — Neueste Ausführung eines hydraulischen Modells der Leydener Flasche mit Wassermanometern; das Ganze ist der Deutlichkeit halber senkrecht angeordnet. Die Pumpe ist eine Druckpumpe, deren Cylinder am oberen Ende mit dem Behälter verbunden ist, um überflüssiges Wasser abzuleiten. Die einzelnen Theile sind dem Schema auf Fig. 10 und dem Modell auf Fig. 11 entsprechend bezeichnet.

Ehe man einen der Apparate benutzt, ist es wesentlich, seine sämmtlichen Röhren und Gefässe vollständig mit Wasser zu füllen. Eine grosse Luftblase, die sich bei dem ersten Modell (Fig. 11) oben in der Glaskugel bildete, war anfangs schwer zu entfernen. Obgleich sie an dieser Stelle wenig störte, ist zu ihrer Entfernung bei der neusten Ausführung (Fig. 12) ein Hahn angebracht. Die Manometer auf Fig. 11 können auch ersetzt werden durch solche, die in einem Projektionsapparat angeordnet und durch biegsame mit Luft angefüllte Schläuche verbunden sind.

25. Ich bin deshalb so ausführlich auf die hydraulische Darstellung der Erscheinungen an der Leydener Flasche eingegangen, weil diese den Schlüssel liefern zu einem grossen Theil der Elektrostatik. Die Darstellung ist zwar nicht vollständig; verbinden wir aber mit ihr unsere Erfahrungen an den Seilmodellen und die bereits erworbenen Anschauungen über Leitung und Isolation im Allgemeinen, so bringt sie uns entschieden um einen Schritt weiter.

Man denke sich die elektrischen Erscheinungen hervorgebracht durch eine alles durchdringende, in Gallerte eingebettete Flüssigkeit; man denke sich die Leiter als Hohlräume und Röhren in dieser Gallerte; man denke sich die Elektrisirmaschine als eine Pumpe; Ladung als Vermehrung und Verminderung; Anziehung als hervorgerufen durch Spannung; Entladung als Zerplatzen; Entladung der Leydener Flasche als ein Zurückschnellen

oder einen Rückschlag, der so lange oscillirt, bis seine Energie verbraucht ist.

Gewöhnt man sich an diese Denkungsweise, so gewinnt man ein richtigeres Verständniss für den Gegenstand und einen tieferen Einblick in die wirklichen Vorgänge der Natur — so unbekannt auch diese, streng genommen, noch sein mögen — als wenn man an der alten Vorstellung von einer Wirkung in die Ferne festhält, oder sich garkeiner Theorie bedient, mit Hülfe deren man die Thatsachen unter einander verknüpfen kann. Man wird so der Wahrheit um einen Schritt näher kommen; freilich nur um einen Schritt.

Welche Veränderungen und Zusätze noch gemacht werden müssen, ehe eine vollständige Theorie der Elektricität entsteht, das kann ich nicht mit Bestimmtheit voraussagen. Doch bin ich überzeugt, dass es viele sein werden; ebenso überzeugt bin ich aber, dass es unvernünftig wäre, zwischen einer Menge komplicirter Erscheinungen umherzutappen, ohne einen anderen Anhalt als den starrer, mathematischer Formeln.

Die mathematische Theorie des Potentials hat zwar für sicheren, zuverlässigen Fortschritt gesorgt und macht es mathematisch geschulten Forschern möglich, sich bis jetzt ohne Theorien der Elektricität und ohne bildliche Vorstellungen zu behelfen. Doch giebt es nur Wenige, deren Einsicht stark genug wäre, um aller geistigen Hülfsmittel mit Ausnahme der strengsten, formellsten entrathen zu können; und Niemand, der nicht aus

einer bildlichen Darstellung der wirklichen Vorgänge Gewinn ziehen würde, wenn diese mit Sicherheit anwendbar wäre.

Eine solche habe ich versucht meinen Lesern theilweise vorzuführen und hoffe dadurch, sofern es mir gelungen ist mich verständlich zu machen, ein wenig zur Erleichterung des Studiums der Elektricität beigetragen zu haben.

Anmerkung.

Herr Fitzgerald hat mich auf einen ziemlich versteckten Fehler auf Seite 69 aufmerksam gemacht, den ich in augenfälliger Weise zu berichtigen wünsche, weil er in der ersten Auflage vorkommt und möglicherweise meine Leser irregeführt hat. Es handelt sich um die Entladung einer isolirten Leydener Flasche. Das hohe Potential, das eine isolirte Flasche nach der Entladung aufweist, hängt vollständig ab von der freien Kapacität ihres Knopfes und ihrer herausragenden Theile. Wäre die innere Belegung ganz in der äusseren eingeschlossen, so könnte das Strömen der Elektricität aus der einen in die andere keine Veränderung des Potentials in der äusseren Belegung hervorbringen, sonst wäre das Resultat des Faraday'schen Versuchs mit dem Eiseimer widerlegt. Es liesse sich einwenden, dass, wenn die eine Belegung auf V und die andere auf Null steht,

das mittlere Potential $^1/_2$ V betragen würde und nach der Entladung unverändert bleiben müsste. Das Potential ist aber nicht eine Menge, die gemittelt wird: das gewöhnliche Potential nach der Entladung, wenn das Innere keine freie Kapacität besitzt, beträgt Null.

THEIL II

LEITUNG

KAPITEL IV

LEITUNG IN METALLEN UND ELEKTROLYTEN

26. Wir haben im Vorhergehenden festgestellt, dass sämmtliche Erscheinungen der Elektrostatik verständlich und theilweise erklärlich werden durch die Annahme, die Elektricität sei ein vollständig inkompressibles Fluidum, oder eine Flüssigkeit, die Alles erfüllt und durchdringt; ferner durch die Annahme, dass diese Flüssigkeit sich in Leitern frei zu bewegen vermag, dass sie aber in Isolatoren und im Raum gleichsam in einem elastischen Mittel oder einer Gallerte festgehalten wird, auf deren Spannung die elektrostatischen Wirkungen zurückzuführen sind. Nach unserer Annahme kann zwar dieses Medium durch gewaltsame Entladung gesprengt werden, ein freier Strom aber kann nur durch Kanäle oder Hohlräume in dem Medium fliessen. Diese entsprechen daher Leitern. Auch war es klar, dass die Flüssigkeit sich nur in einem geschlossenen Kreise bewegen kann.

Ich beabsichtige nun auf die Art und Weise, wie dieses Strömen stattfindet, näher einzugehen. Wir kommen damit zu der zweiten Abtheilung (siehe die Eintheilung, Seite 4) nämlich zur *Elektricität in Fortbewegung.*

Ich brauche den Ausdruck „Fortbewegung" ausdrücklich, um Rotation und Schwingung auszuschliessen. Wir haben uns hier nur mit *Uebertragung* zu beschäftigen.

Man vergegenwärtige sich, auf welche Art man *Wasser* von einer Stelle zur andern fortbewegen kann. Dies ist nur auf zweierlei Weise möglich: entweder man pumpt es durch Röhren, oder man trägt es in Gefässen umher. Mit anderen Worten, es wird *durch* Stoff oder *mit* Stoff befördert. Ebenso verhält es sich mit der *Wärme.* Auch diese kann nur auf zweierlei Art befördert werden: entweder sie fliesst *durch* Stoff: diese Art der Beförderung nennt man „Leitung"; oder sie bewegt sich *mit* Stoff: diese Beförderungsart nennt man „Uebertragung". Auf andere Art lässt Wärme sich nicht übertragen. Zuweilen hört man noch von „Strahlung" als von einer dritten Art der Fortbewegung sprechen; diese aber befördert nicht eigentlich die *Wärme* selbst. Wärme erzeugt Strahlung an einem Ort und diese reproducirt Wärme an einem anderen Ort; das aber, was sich bewegt, ist Strahlung und nicht Wärme. Wärme fliesst unter normalen Verhältnissen aus heissen Körpern in kalte Körper, ebenso wie Wasser unter normalen Verhältnissen bergab fliesst; Strahlung dagegen verbreitet sich beliebig nach allen Richtungen.

Ferner kann Wärme an jedem gegebenen Punkte nur in einer Richtung fliessen, während Strahlung sich gleichzeitig nach allen Richtungen bewegt. Wenn auf einem Planeten das Wasser sich in seine Bestandtheile zersetzte und diese Gase auf einem anderen Planeten wieder vereinigt würden, so hätte nicht das Wasser die Reise vom einen Planeten zum anderen gemacht, noch hätte der Stoff die Gesetze der Wärmebewegung befolgt, sondern das Wasser wäre an einem Ort zerstört und an einem anderen wieder dargestellt worden. Derselbe Unterschied besteht zwischen Strahlung und Wärme.

Die Wärme sowohl wie das Wasser können also nur auf zweierlei Art direkt von Ort zu Ort befördert werden. Dasselbe gilt von der *Elektricität.* Auch sie kann mit Stoff oder durch Stoff, durch Uebertragung oder durch Leitung befördert werden, aber sie kann sich auf keine andere uns bekannte Art fortbewegen.

Leitung in Metallen

27. Betrachten wir zunächst die Leitung. Man verbinde die Pole einer galvanischen Batterie mit den beiden Enden eines Kupferdrahts und vergegenwärtige sich das, was wir „Strom" nennen. Dieser Strom besteht aus einem wirklichen Fliessen von Elektricität zwischen den Molekeln des Drahts. Wäre die Elek-

tricität eine Flüssigkeit, so würde der Strom eine Uebertragung dieser Flüssigkeit sein. Ist die Elektricität kein Stoff, so ist der Strom auch nicht eine stoffliche Uebertragung; er ist aber jedenfalls eine Uebertragung von Elektricität, was diese auch sei. Nehmen wir wieder das Bild einer Flüssigkeit zu Hülfe, so können wir uns vorstellen, dass sie durch die Molekeln des Metalls oder zwischen ihnen dahinfliesst. Wir wissen aber nicht, ob sie durch die Molekeln fliesst oder zwischen ihnen, oder ob eine Molekel sie der anderen weitergiebt; die letztere Annahme gilt im Allgemeinen für die wahrscheinlichste. Man könnte sich also den Strom vorstellen als den beständigen Versuch Atome zu spannen wie ein Dielektricum, und als ein ebenso beständiges Nachlassen dieser Spannung. Die Atome könnte man sich als kleine Leiter denken, die schwingen und dabei aneinanderstossen, sodass sie sich eine elektrische Ladung, falls sie eine solche besitzen, mit Leichtigkeit mittheilen können. In einem so beschaffenen Mittel könnte die Elektricität in ganz ähnlicher Weise fortgeleitet werden, wie dies thatsächlich in Metallen geschieht. Jedes Atom würde eine Ladung von den hinter ihm befindlichen Atomen erhalten und sie den vorderen weitergeben; auf diese Art würde die Elektricität in dem Draht fortgeleitet. Man hüte sich aber davor, dieses Bild für etwas anderes zu halten, als für eine *mögliche* Methode, die Leitung auf eine Art Elektrostatik, dass heisst auf den Austausch

elektrischer Ladungen durch eine Kette von Leitern zurückzuführen. Wenn eine solche Kette von schwingenden und kollidirenden Theilchen existirte, so könnte allerdings eine Ladung, die an irgend einem Punkt mitgetheilt würde, sich rasch ausbreiten und das Potential würde binnen Kurzem überall gleich werden; daraus folgt aber keineswegs, dass der wirkliche Vorgang der Leitung sich in dieser Weise abspielt. Einfacher und bequemer ist es jedenfalls, sich vorzustellen, der Draht lasse die Elektricität hindurchgehen, wie eine mit Sand oder Kieselsteinen gefüllte Röhre Wasser durchlässt. Dieser rohe Vergleich kann für die meisten, wenn auch nicht für alle Zwecke genügen.

Lassen wir zunächst die eigentliche Fortbewegungsart als unbekannt bei Seite und fassen wir das zusammen, was wir mit Bestimmtheit von dem Vorgang wissen, den wir Leitung in homogenen Metallen nennen. Folgende Thatsachen sind als sicher bekannt:

(1) Der Draht erhitzt sich beim Durchgang des Stroms.

(2) Das Bestreben, ein Zurückfliessen oder eine Spannung in umgekehrter Richtung zu erzeugen, besteht in keiner Weise.

(3) Die Elektricität hat einen gewissen Widerstand oder ein reibungsartiges Hinderniss zu überwinden.

(4) Die Kraft dieses Widerstandes ist genau proportional der Geschwindigkeit, mit der die Elektricität das Metall durchströmt — d. h. proportional der Intensität des Stroms bezogen auf die Querschnittseinheit.

28. Diesem letzten Satz ist noch Einiges hinzuzufügen: Die Menge von Elektricität, die in einer Sekunde durch eine Querschnittseinheit befördert wird, nennt man Stromintensität.[1]) Der Versuch hat Ohm's aus der Analogie der Wärmeleitung aufgestellte Vermuthung bestätigt, dass diese Intensität genau proportional ist dem Potentialgefälle, das den Strom verursacht; d. h. da Wirkung und Gegenwirkung einander gleich und entgegengesetzt sind, hat der Strom in einem Leiter eine elektromotorische Gegenkraft zu überwinden, die ihm genau proportional ist. Kurz gesagt, ein Strom, der durch einen gegebenen Leiter fliesst, ist proportional der elektromotorischen Kraft, die ihn vorwärts treibt. Das besondere Verhältniss zwischen dem Potentialgefälle und der entsprechenden Stromintensität hängt von der besonderen Beschaffenheit des Stoffs ab, aus dem der Leiter besteht, und ist eine Konstante dieses Stoffs, die durch direkte Messung bestimmt werden kann. Man nennt sie sein „specifisches Leitungsvermögen", oder seinen „specifischen Widerstand", je nach dem Gesichtspunkt, von dem aus man sie betrachtet.

Unter allen wissenschaftlichen Lehrsätzen ist dieses sogenannte Ohm'sche Gesetz eines der am genauesten bekannten. Aber es ist ein rein empirischer Satz,

[1]) Für diese Grösse ist sonst der Ausdruck „Stromdichte" gebräuchlich. Intensität ist aber die naturgemässe und richtige Bezeichnung.

denn man weiss keinen Grund dafür; man muss es als eine durch das Experiment nachgewiesene Wahrheit einfach annehmen. Es ist aber unzweifelhaft von ungeheurer, weittragendster Bedeutung, weil es eine einfache und bestimmte Beziehung zwischen Elektricität und gewöhnlicher Materie aufstellt. In der Sprache der Hydraulik ausgedrückt, stellt es fest, dass, wenn Elektricität durch Materie strömt, die Reibung zwischen beiden sich genau verhält wie die erste Potenz der Geschwindigkeit und zwar für alle Geschwindigkeiten.

29. Wenn man sich nun diese elektromotorische Gegenkraft als der Reibung analog denkt, so liegt die Vermuthung nahe, dass durch den elektrischen Strom Wärme erzeugt wird, und dass der Grad dieser Wärmeerzeugung direkt proportional sein wird der Stärke des Stroms und seiner Gegenkraft. Joule hat dies durch den Versuch erwiesen.

Wer durch diese unbestimmte Analogie nicht befriedigt ist und das Bedürfniss fühlen sollte, tiefer in das eigentliche Wesen der Wärme und in die Art, wie sie erzeugt wird, einzudringen, der kehre zurück zur Vorstellung von zahllosen, schwingenden, an einander stossenden Theilchen, die sich mit einer gewissen durchschnittlichen Energie bewegen und dadurch die sogegenannte „Temperatur" der Körper bestimmen. Erhält eines oder mehrere dieser Theilchen einen Stoss, so vertheilt sich die Energie dieses Stosses rasch unter die übrigen, und Alle fangen an sich heftiger zu

bewegen: die Temperatur des Körpers, den sie bilden, wird „steigen". So erklärt sich die Wärmeerzeugung durch einen Stoss und andere mechanische Mittel. Nun aber ertheile man einem der Theilchen statt des *Stosses* eine elektrische Ladung, oder, besser noch, man bringe in den Bereich seiner Schwingungen eine konstante Elektricitätsquelle, von der es bei jeder Berührung eine Ladung erhält. Zugleich bringe man in den Bereich anderer Theilchen desselben Körpers einen Behälter von unendlicher Kapacität, der im Stande ist alle Elektricität abzuleiten, die jene Theilchen erhalten. Zum wirklichen Gebrauch sind unendliche Behälter nicht nöthig; es genügt, zwei endliche Behälter oder „Elektroden", wie wir sie jetzt bezeichnen wollen, mit einer Vorrichtung zu verbinden, die einen konstanten elektrischen Strom aus dem einen in den anderen hinüberleitet, z. B. etwa mit den Polen einer galvanischen Batterie oder einer Holtz'schen Maschine.

Was geschieht nun, wenn eine Reihe elektrischer Ladungen auf solche Weise durch eine Ansammlung von Theilchen hindurchgeht? Offenbar wird das Empfangen und Weitergeben der Ladung die ursprüngliche Bewegung jedes Theilchens beschleunigen und die Temperatur des Körpers wird steigen. Man erhält damit eine Vorstellung, wie der elektrische Strom Wärme zeugt.

Dieser Vergleich giebt jedoch kein treues und vollständiges Bild des wirklichen Vorganges; vielmehr ist

es der *Schall*, der auf die oben beschriebene Weise fortgeleitet wird. Bekanntlich pflanzt sich der *Schall* mit bestimmter Geschwindigkeit, als eine mechanische Störung, von Theilchen zu Theilchen fort. Aber auch die *Wärme*, als eine Art der Bewegung, muss auf ähnliche Weise fortgeleitet werden, sodass sie sich, wenn sie auf einen Punkt eines Körpers einwirkt, durch die ganze Masse desselben verbreitet. Es ist kaum anzunehmen, dass die Fortleitung der Wärme anders erfolgen könnte, als durch von Theilchen zu Theilchen mitgetheilte molekulare Schwingungen; und doch gehorcht sie ganz anderen Gesetzen als jene gröbere Störung, die wir *Schall* nennen. Nun haben wir zwar keine genaue Kenntniss von dem Wesen der Wärmeleitung, doch unterliegt es kaum einem Zweifel, dass die Fortleitung der Elektricität in Metallen auf ganz ähnliche Weise stattfindet; beide Erscheinungen unterliegen denselben Gesetzen: beide breiten sich diffundirend aus, beide sind dem Ohm'schen Gesetz unterworfen und ein guter Wärmeleiter ist stets auch ein guter Elektricitätsleiter.

Leitung in Flüssigkeiten

30. Wir wollen jetzt das dunkle Gebiet der Leitung in Metallen verlassen und uns mit der Frage beschäftigen, wie Elektricität in Flüssigkeiten fortgeleitet wird. Unter *Flüssigkeiten* verstehen wir in diesem Zu-

sammenhange bestimmte chemische Verbindungen, Säuren, Alkalien, Salzwasser und Salzlösungen überhaupt. Einige Flüssigkeiten, wie Alkohol, Terpentin, Schwefelkohlenstoff und Wasser leiten die Elektricität in ganz reinem Zustande überhaupt nicht oder nur sehr schlecht. Sie können wie Luft und Gase, als mehr oder weniger vollkommene Dielektrica gelten. Andere Flüssigkeiten, wie Quecksilber und geschmolzene Metalle überhaupt leiten auf dieselbe Art, als ob sie in festem Zustande wären, und gehören daher zu den metallischen Leitern.

Die meisten chemischen Verbindungen leiten jedoch auf eine besondere, ihnen eigenthümliche Art, wenn sie durch Wärme oder durch Lösung flüssig geworden sind. Diese Flüssigkeiten werden „Elektrolyte" genannt.

31. Der gegenwärtige Stand unserer Kenntnisse gestattet uns folgende Behauptungen mit ziemlicher Sicherheit aufstellen:

(1) Elektrolytische Leitung ist stets begleitet von chemischer Zersetzung und findet thatsächlich nur durch diese statt.

(2) Die Elektricität strömt nicht *durch* die Atome des Stoffes, sondern *mit* ihnen; diese bewegen sich fort und befördern ihre Ladungen ähnlich wie Markkügelchen zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Scheiben.

(3) Die zu jedem Stofftheilchen gehörige elektrische Ladung ist ein einfaches Multiplum von einer bestimm-

ten Elektricitätsmenge; diese Menge ist eine absolute Konstante und ganz unabhängig von der Beschaffenheit der besonderen Substanz, zu der die Stofftheilchen gehören.

(4) Die Leitung der positiven Elektricität durch eine Flüssigkeit entspricht ungefähr der Wanderung der elektro-positiven Atome einer Verbindung in der „*Stromrichtung*"; gleichzeitig wird die negative Elektricität durch eine ähnliche Wanderung der elektronegativen Atome in umgekehrter Richtung geleitet.

(5) Sobald ein Atom eine Elektrode erreicht, kann es sich seiner elektrischen Ladung entledigen und unter Vereinigung mit anderen Atomen derselben Art frei werden; in diesem Fall erfolgt eine sichtbare Zersetzung. Oder es findet andere Stoffe, etwa in der Elektrode oder der Lösung, mit denen es sich verbindet; in diesem Fall findet zwar auch eine Zersetzung statt, aber sie ist verdeckt und daher unsichtbar.

(6) Andererseits kann aber ein Atom seine elektrische Ladung so hartnäckig festhalten, dass es den Strom aufhält; der Widerstand, den solche Atome auf den Strom ausüben, nennt man Polarisation.

(7) Dieser Widerstand oder diese Gegenspannung findet nicht im Innern einer Flüssigkeitsmenge sondern nur an den Elektroden statt.

32. Die drei ersten Sätze enthalten kurz zusammen-

gefasst Faraday's Gesetze von der Elektrolyse. Diese Gesetze sind von weittragender Bedeutung und scheinen der Wahrheit vollkommen zu entsprechen. Das erste heisst das „voltametrische Gesetz" und stellt fest, dass die in einer gegebenen Substanz durch Elektrolyse erzeugte chemische Wirkung genau proportional ist der Elektricitätsmenge, die hindurchgeschickt wurde. Die unbestimmte Bezeichnung „chemische Wirkung" ist hier absichtlich gewählt, um Zersetzung, Neubildung, Freiwerden, Niederschlag und Auflösung, kurz, sämmtliche Wirkungen, die durch einen elektrischen Strom in Elementen oder chemischen Verbindungen hervorgebracht werden können, auszudrücken. Das Gewicht der Producte der Elektrolyse giebt ein Maass für die Menge der aufgewandten Elektricität. Eine Zersetzungszelle kann somit als Voltameter dienen, und darum heisst dieses Gesetz das voltametrische Gesetz. Seine Richtigkeit ermöglicht die Aufstellung des ersten der oben angeführten Sätze. Zahlreiche qualitative, die Einzelheiten der Elektrolyse betreffende Thatsachen führen uns zum Satze Nr. 2.

Das zweite Faraday'sche Gesetz ist das Gesetz von der elektro-chemischen Aequivalenz. Es stellt fest, dass, wenn derselbe Strom während eines gleichen Zeitraums durch eine Reihe von Voltametern geleitet wird, die Summe der in jeder Substanz stattfindenden chemischen Wirkung genau proportional ist dem gewöhnlichen chemischen Aequivalent der Substanz; nicht ihrem blossen

Atomgewicht, sondern ihrem Atomgewicht dividirt durch ihre sogenannte Valenz, Atomigkeit oder Quantivalenz; denn diese ist ihre eigentliche chemische Aequivalenz. So wiegt z. B. ein Atom Sauerstoff sechzehn mal so viel wie ein Atom Wasserstoff und ist an Bindekraft zwei solchen Atomen aequivalent; nach dem Faraday-schen Gesetz werden also 8 Gramm Sauerstoff auf ein Gramm Wasserstoff frei. Ferner: Ein Atom Silber wiegt 108 mal soviel wie ein Atom Wasserstoff und besitzt gleiche Bindekraft. Folglich werden 108 Gramm Silber in einem Silbervoltameter niedergeschlagen, während durch denselben Strom in einem Gasvoltameter nur 1 Gramm Wasserstoff frei wird. Ferner: 1 Atom Gold wiegt ebensoviel wie 197 Atome Wasserstoff und ersetzt in Verbindungen 3 derselben; folglich werden 65,7 Gramm Gold durch denselben Strom in derselben Zeit niedergeschlagen u. s. w.

Das Gesetz ergiebt also klar, dass durch eine gegebene Menge Elektricität eine gleiche Menge einwerthiger Atome, halb soviel zweiwerthige und ein Drittel soviel dreiwerthige Atome frei werden, einerlei welcher Substanz sie angehören. Wenn nun, wie wir angenommen haben, die Elektricität durch reine Uebertragung fortgeleitet wird, d. h. wenn jedes Atom eine elektrische Ladung befördert (siehe Satz 2), so muss jedes einwerthige Atom die gleiche Menge befördern, gleichviel ob es ein Silber- oder ein Chlor-Atom ist, oder ob es einem zusammengesetzten Radikal wie NO_3

angehört; jedes zweiwerthige Atom muss zweimal soviel befördern, gleichviel ob es aus Sauerstoff, Zink, Kupfer oder einem zusammengesetzten zweiwerthigen Radikal wie SO_4 besteht; jedes dreiwerthige Atom muss dreimal soviel befördern u. s. w. Diese Thatsache ist in dem dritten der oben angeführten Sätze ausgedrückt.

Es wäre allerdings denkbar, dass jedes Atom eine specifische Ladung besässe, von der es sich nie trennt. Da wir hierüber aber nichts wissen, so können wir nur Versuche anstellen mit derjenigen Ladung, deren es sich an der Elektrode entledigt. Zweifellos ist diese Ladung für alle Substanzen genau dieselbe und kann proportional der Werthigkeit einfach multiplicirt werden. Die Ladung eines einwerthigen Atoms ist die kleinste Elektricitätsmenge, die wir kennen, und bildet eine wirkliche, natürliche Einheit. Augenscheinlich ist dies eine Thatsache von grosser Bedeutung. Diese natürliche Einheit, über die hinaus wir nichts kennen, ist sogar als „Elektricitätsatom" bezeichnet worden und vielleicht ist der Ausdruck nicht ganz ohne Sinn. Früher schon erlaubte ich mir auf einige Wirkungen hinzuweisen, die aus der Annahme folgen würden, diese Einheit sei wirklich ein absolutes Minimum und sei ebenso untheilbar, wie ein Stoffatom.[1])

Bei der Kleinheit der Ladung ist das Potential jedes einzelnen Atoms nicht hoch. Die Spannungsdifferenz

[1]) Siehe den Aufsatz über „Electrolyse" (Berichte der British Assoc. v. J. 1885; p. 763).

zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Atomen dürfte etwa 1 bis 3 Volt betragen. Die Atome sind einander jedoch so nahe, dass selbst diese geringe Spannungsdifferenz eine starke elektrostatische Anziehung oder „chemische Verwandtschaft" zwischen entgegengesetzt geladenen Atomen zur Folge hat.

Die zwischen zwei Atomen bestehende elektrische Kraft ist auf jede Entfernung zehntausend Millionen Billionen Billionen mal grösser als die von ihrer Schwerkraft herrührende Anziehung auf dieselbe Entfernung. Die Intensität dieser Kraft per Masseneinheit ist beinahe eine Trillion mal grösser und wird daher eine ebenso viel mal grössere Beschleunigung hervorbringen, als diejenige der Schwerkraft der Erde in der Nähe der Erdoberfläche beträgt.

Diese Kräfte haben die Chemiker unter dem Namen „chemische Verwandtschaft" schon seit lange studirt.

33. Wenn aber, lässt sich einwenden, die Atome jeder Molekel vermöge ihrer elektrostatischen Anziehungskraft so fest zusammenhalten, und wenn sich zwischen zwei Elektroden eine ungeheure Anzahl solcher Atome befindet, wie kommt es, dass eine schwache elektromotorische Kraft sie trennen und eine Zersetzung verursachen kann? wie kommt es ferner, dass die zur Zersetzung nöthige elektromotorische Kraft nicht proportional ist der Dicke der Flüssigkeitsschicht zwischen den Elektroden? Und doch hängt sie überhaupt nicht davon ab und es ist ganz unwesentlich, wieviel Flüssigkeit sich zwischen

den Elektroden befindet. Dieser Umstand beweist, dass in der Hauptmasse der Flüssigkeit die Atome überhaupt nicht auseinandergerissen werden. Wahrscheinlich bleiben aber die einzelnen Atom-Paare nicht dauernd verbunden, sondern trennen sich zuweilen, um sich mit anderen Individuen zu vereinigen. Während dieses Austausches müssen Augenblicke eintreten, wo die Atome halbfrei sind und dem schwächsten Impulse in irgend einer gegebenen Richtung folgen; solche Augenblicke benutzt höchst wahrscheinlich die einwirkende elektromotorische Kraft.

Die Ueberzeugung vom wirklichen Vorhandensein eines solchen fortwährenden Austausches hat sich den Chemikern durch die Erscheinungen der doppelten Umsetzung aufgedrängt; z. B. durch die Thatsache, dass beständige Salze, wenn ihre Lösungen vermischt werden, ihre Atome so austauschen, dass viel schwächere Verbindungen entstehen. Besonders augenfällig ist die Bildung solcher Verbindungen, wenn sie zufällig unlöslich sind. Die Thatsache, dass ein Niederschlag sich immer bildet, sobald eine genügend unlösliche Verbindung möglich ist, beweist, dass auch stets eine kleine Menge der entsprechenden anderen Verbindung gebildet wird, ob sie nun unlöslich ist oder nicht.

Dieser Zustand fortwährenden Austausches erzeugt eine Empfindlichkeit gegen die Einwirkung ausserordentlich schwacher motorischer Kräfte, die es selbst der schwächsten Spur einer elektromotorischen Kraft er-

möglicht, die Atome zu beeinflussen; und zwar befördert sie im Durchschnitt die positiven Atome *mit* dem Potentialgefälle und die negativen Atome *gegen* dasselbe. Der Umstand, dass schon die minimalste Kraft ihren Antheil an der Zersetzung hat, ist durch die Versuche von Helmholtz klar und erschöpfend nachgewiesen worden.

Man braucht zuweilen den Ausdruck „Dissociation" für diese Fähigkeit der Atome, sich frei zu bewegen. Die von Clausius herrührende Anschauung setzt auch in der That eine wirkliche Dissociation voraus. Er nahm an, dass ein gewisser Procentsatz Atome in ungebundenem Zustande in der Flüssigkeit existire und auf der Suche nach Gefährten umherwandere; auf diese freien Atome wirke die elektromotorische Kraft ein und durch sie werde der Strom befördert. Heute erkennen wir, dass die Vorstellung von der doppelten Umsetzung oder vom Austausch der Atome, im Verein mit der ursprünglichen Hypothese von Grotthus eine ausreichende Erklärung der Thatsachen liefert. Statt einer dauernden, thatsächlichen Dissociation tritt nur eine virtuelle oder potentielle Dissociation oder ein augenblicklicher Zustand der Unentschiedenheit ein.

Eine gewisse durchschnittliche Zahl von Atomen ist sozusagen halb frei und bereit jeder motorischen Kraft nachzugeben, ohne deshalb nothwendiger Weise länger als eine kurze, wenn auch endliche Spanne Zeit frei zu bleiben. Je mehr derartige halbfreie Atome vorhanden

sind, um so besser wird die Flüssigkeit leiten. Der Vorgang des Leitens besteht wahrscheinlich, ähnlich wie Grotthus ihn sich dachte, in dem Weitergeben einer Ladung durch eine Kette von sich zersetzenden und wieder neubildenden Molekeln; aber die molekulare Zersetzung ist selbstthätig, d. h. der elektrische Strom erzeugt sie nicht, sondern er giebt ihr nur die Richtung. Das *Resultat* ist dasselbe, als ob eine zweifache Wanderung freier geladener Atome zwischen den Elektroden durch die Flüssigkeit stattfände, und in vielen Fällen ist es am Einfachsten sich den Vorgang auf diese Art vorzustellen.

34. Ich möchte nun auf unsere mechanischen Analogien und Modelle zurückkommen und damit die elektrolytische Leitung noch klarer veranschaulichen.

Auf den beiden Figuren 5 und 6 hatten wir Bilder von metallischer Leitung und von dielektrischer Influenz. Bei beiden wird durch eine einwirkende elektromotorische Kraft die Elektricität fortbewegt. Im ersteren Fall besteht aber diese Bewegung in einem fortdauernden, stetigen, fast unbehinderten Fliessen durch die Stofftheilchen oder zwischen ihnen, während sie im letzteren Fall nur aus einer augenblicklichen Verschiebung oder Verrückung besteht, welche die Stofftheilchen mitreisst und daher einem lebhaften Widerstand begegnet. Dieser Widerstand ist keine blosse Reibung, die nur hemmt, ohne aufzuhalten, sondern er ist eine starke federnde

Kraft. Diese unterbricht den Strom sofort, verursacht das, was wir Isolirung nennen, und ruft schliesslich, wenn die treibende Kraft entfernt wird, eine rasche Bewegung in umgekehrter Richtung oder eine Entladung hervor. Aber das Modell ist offenbar unvollständig; denn woran sind die Atome befestigt? Was vertritt die Stelle der *Leiste*, die wir an dem rohen Mechanismus wahrnehmen? Offenbar eine andere Reihe von Atomen, die durch eine gleichzeitig in umgekehrter Richtung einwirkende, negative elektrische Kraft entweder festgehalten oder in dieser Richtung verschoben werden. (Siehe Fig. 7a S. 51). Man muss sich also zwei oder mehr Reihen von Kügelchen denken; jede Reihe ist für sich auf einem Seil aufgezogen; die Seile stellen abwechselnd positive und negative Elektricität dar und werden durch eine gegebene elektromotorische Kraft gleichzeitig in entgegengesetzter Richtung verschoben. Die Kügelchen eines Seils sind je mit den Kügelchen eines anderen zwar parallel aber in entgegengesetzter Richtung laufenden Seils durch Gummibänder verbunden, sodass die Seile sich nicht beliebig weit an einander vorbei bewegen, sondern sich nur mässig gegen einander verschieben können, um alsdann in der oben geschilderten Weise zurückzuschnellen und zu oscilliren.

Nun aber denke man sich sämmtliche Gummibänder gelöst und auf jedes Seil wieder eine Kraft einwirkend, durch welche die eine Hälfte in der einen, die andere in der anderen Richtung bewegt wird; als-

dann hat man das Modell eines Elektrolyts und das einfachste Bild von elektrolytischer Leitung. Die Atome sind nicht mehr an einander, wohl aber an dem Seil befestigt. Durch den ersten Umstand wird der Elektrolyt von einem Dielektricum, durch den zweiten von einem Metall unterschieden.

Wir überzeugten uns ferner, dass elektrolytische Leitung kaum als eigentliche Leitung betrachtet werden kann; die Elektricität bewegt sich dabei nicht durch oder zwischen den Molekeln, sondern sie bewegt sich mit ihnen. Die Bestandtheile einer jeden Molekel sind unabhängig von einander, und während ein System von Atomen positive Elektricität befördert, befördert ein anderes System negative Elektricität in der entgegengesetzten Richtung, sodass der Strom durch eine Wanderung freier Atome fortgepflanzt wird. Der Vorgang zeigt den Charakter der Uebertragung: die Atome dienen als Träger. Die freie Fortbewegung geladener Atome ist eine wesentliche Bedingung der Elektrolyse.

Um nun den Vergleich mit Fig. 5 und 6 zu erleichtern und die unterscheidenden Merkmale hervorzuheben, wurde Fig. 13 entworfen. Die Kügelchen, welche eine Reihe von Atomen darstellen sollen, haften so fest an dem Seil, dass keine Spur einer Verrückung zwischen Kügelchen und Seil möglich ist; sonst aber sind sie frei und werden deshalb dargestellt als nur von Ringen gehalten, die lose auf Glasstäben laufen. Der

einzige Widerstand gegen eine Bewegung rührt, mit Ausnahme der geringen Reibung, von der Elektrode her und ist durch eine federnde Messerklinge wiedergegeben. Diese Messerklinge soll im Stande sein,

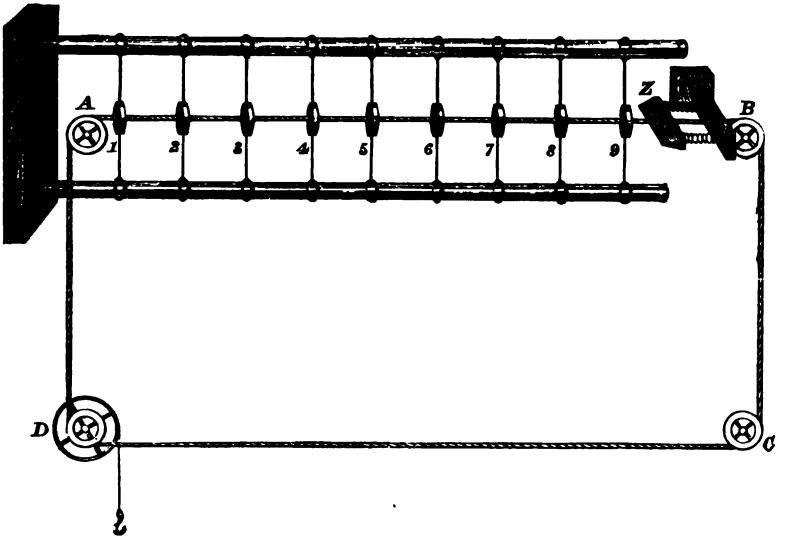


Fig. 13. — Rohe mechanische Analogie zur Erläuterung einiger Eigenschaften eines zum Theil *elektrolytischen* Stromkreises.

die Kügelchen von dem Seil los zu trennen, wenn sie mit hinreichender Gewalt dagegen gedrückt werden. Der Zusammenhang zwischen den Kügelchen und dem Seil (d. h. zwischen jedem Atom und seiner Ladung) ist aber stark genug, um die Feder merklich zusammen-

2326825

zupressen und dadurch einen Rückschlag zu erzeugen, der uns die Polarisation veranschaulichen kann.

Das Stück Seil, das jedes Kügelchen auf seinem Wege begleitet (d. h. der Abstand zwischen je zwei Kügelchen), stellt die Atomladung dar und ist eine konstante Grösse; nur ist diese Grösse bei sogenannten zweiwerthigen Atomen doppelt zu nehmen; bei drei- und vierwerthigen Atomen drei- und vierfach u. s. w.; sonst aber ist sie keinen Schwankungen unterworfen.

Das Seil möge nun positive Elektricität darstellen, und die daran aufgereihten Kügelchen seien Atome von Wasserstoff oder von einem anderen einwerthigen *Kation*, die stromabwärts nach der Kathode ziehen. Daneben sei ein zweites Seil gedacht, das negative Elektricität darstellt, dessen Kügelchen aber zweimal so weit von einander entfernt sein sollen, die also Atome eines zweiwerthigen *Anions* z. B. des Sauerstoffs darstellen. Sind nun beide Seile mechanisch derart verbunden, dass sie sich mit gleicher Geschwindigkeit in entgegengesetzten Richtungen bewegen müssen, so erhalten wir ein Modell, das mehrere wichtige Thatsachen erläutert. Offenbar werden in einer gegebenen Zeit nur halb so viel Sauerstoffatome frei werden wie Wasserstoffatome, und die Sauerstoffatome werden daher in gasförmigem Zustande nur das halbe Volumen einnehmen. Ferner wird bei allen Elementen die Zahl der in einer gegebenen Zeit freiwerdenden Atome gleich sein der Zahl von Wasserstoffatomen, die in derselben Zeit frei

wird, dividirt durch die Valenz des betreffenden Elementes im Verhältniss zum Wasserstoff. Es ist dies ein von Faraday entdecktes Gesetz, das der Wahrheit genau zu entsprechen scheint. Da nun das relative Gewicht eines jeden Elements ziemlich genau bekannt ist, so lässt sich leicht berechnen, wieviel Gewichtstheile der Substanz ein gegebener Strom in einer Stunde niederschlagen oder freimachen wird, nachdem dieser Werth für eine Substanz einmal durch den Versuch festgestellt ist.

Ergebnisse

Kurz zusammengefasst sind wir also zu folgenden Resultaten gelangt:

Lässt man eine elektromotorische Kraft auf Metalle einwirken, so findet ein dauernder Strom statt und man erhält Wärme.

Lässt man dieselbe Kraft auf Dielektrica einwirken, so findet ein vorübergehender Strom oder eine Verrückung statt und man erhält die potentielle Energie, die wir „Ladung" nennen.

Lässt man dieselbe Kraft auf Elektrolyte einwirken, so findet wieder ein dauernder Strom statt und man erhält chemische Zersetzung.

36. Die elektrolytische Leitung weist noch zahlreiche andere wichtige Punkte auf, welche eine nähere

Betrachtung verdienen; ich möchte aber hier nur Einen ganz besonders hervorheben, nämlich dass diese Leitung durch eine Wanderung positiv geladener Atome in einer Richtung und einer ebensolchen Wanderung negativ geladener Atome in der entgegengesetzten Richtung bewirkt wird.

Man mag unter positiver und negativer Ladung verstehen, was man will, soviel ist gewiss, dass z. B. bei einer Wassermolekel die Wasserstoffatome positiv, die Sauerstoffatome negativ geladen sind, und es ist wohl als sicher anzunehmen, dass sie vermöge der Anziehungskraft zwischen ihren entgegengesetzten Ladungen zusammenhängen. Sicher ist ferner, dass, wenn eine elektromotorische Kraft, d. h. eine Kraft, die im Stande ist, Elektricität zu bewegen, auf die Flüssigkeit einwirkt, die Wasserstoffatome im Allgemeinen in der einen Richtung, nämlich bergab, die Sauerstoffatome in der anderen Richtung, nämlich bergauf, wandern, sofern wir dieses Gleichniss aus der Hydrostatik auf das Potentialgefälle anwenden dürfen. Die Atome werden gleichsam wie geladene Markkügelchen durch ihre elektrische Ladung fortbewegt und dienen auf diese Weise als Träger der Elektricität, die sonst ausser Stande sein würde, durch die Flüssigkeit hindurch zu gelangen.

Diese beiden Wanderungen ziehen in entgegengesetzten Richtungen ununterbrochen dahin, bis sie auf irgend ein Hinderniss, sei es auf eine Veränderung in der Flüssigkeit, sei es auf einen festen Leiter stossen.

Im ersteren Fall übernimmt einfach ein anderes System von Atomen die Uebertragung, ohne dass man davon etwas wahrzunehmen braucht. Ein fester Leiter aber hält die Wanderung auf, weil seine Atome sich nicht frei bewegen können. Ein derartiges Hinderniss kann entweder die Wanderung und mit ihr den Strom vollständig unterbrechen; oder die elektromotorische Kraft kann so stark sein, dass sie den Atomen ihre Ladung entreisst, diese den Elektroden zur Weiterbeförderung durch gewöhnliche Leitung mittheilt und die Atome so zusammendrängt, dass diese sich miteinander verbinden und frei werden.

Nun beachte man den Umstand, dass die Atome in zwei entgegengesetzten Richtungen wandern. Unmöglich können die Ionen der einen Gattung an einer Elektrode frei werden, ohne dass genau die entsprechende Zahl von Ionen der anderen Gattung an der anderen Elektrode sich niederschlägt oder sonst irgendwie zum Vorschein kommt. Mit anderen Worten, es kann unmöglich eine Wanderung von positiven Atomen durch eine Flüssigkeit stattfinden, ohne eine gleichzeitige entsprechende Wanderung von negativen Atomen. Oder noch anders ausgedrückt, der elektrische Strom in einer Flüssigkeit besteht aus einem Fliessen der positiven Elektricität in einer Richtung und einem gleichzeitigen Fliessen der negativen Elektricität in der anderen Richtung. Erweist sich diese Behauptung als zutreffend für Flüssigkeiten, warum sollte sie nicht überall Anwendung

finden? Jedenfalls muss man diese Möglichkeit im Auge behalten.

Wir kennen noch einen anderen Fall, bei dem der elektrische Strom sicher aus zwei einander entgegengesetzten elektrischen Strömungen besteht; nämlich den der Holtz'schen Maschine. Dreht man die Maschine, während ihre Pole auf irgend eine Art verbunden sind, so dient die Glasscheibe als Träger und befördert mit jeder halben Umdrehung eine elektrische Ladung von einer Sammelspitze zur anderen. Mit der einen halben Umdrehung befördert sie positive Elektricität, mit der anderen negative Elektricität. Ihre obere Hälfte ist immer positiv geladen und bewegt sich vorwärts, die untere Hälfte ist negativ geladen und bewegt sich rückwärts.

Bei der Holtz'schen Maschine sind die Geschwindigkeiten immer gleich gross, nicht aber die Ladungen. Bei der Elektrolyse dagegen sind die Ladungen gleich, nicht aber die Geschwindigkeiten. Vielmehr wandert nach einem von Kohlrausch entdeckten Gesetz jedes Atom in einer gegebenen Flüssigkeit mit der ihm eigenen Geschwindigkeit, die unabhängig ist von der Substanz, mit der es vorher verbunden war. Wasserstoff wandert z. B. schneller als irgend ein anderes Atom und die Summe der Wanderungs-Geschwindigkeiten der zwei entgegengesetzten Atome einer Verbindung bestimmt das Leitungsvermögen dieser Flüssigkeit. Säuren leiten im Allgemeinen besser als ihre Salze.

37. Die folgende Tabelle enthält die Geschwindigkeiten, mit denen Atome verschiedener Elemente unter der Einwirkung eines Potentialgefälles von 1 Volt auf den Centimeter durch annähernd reines Wasser wandern [1]):

H	1.08	cm	per	Stunde
K	0.205	„	„	„
Na	0.126	„	„	„
Li	0.094	„	„	„
Ag	0.166	„	„	„
Cl	0.213	„	„	„
I	0.216	„	„	„
No_3	0.174	„	„	„

[1]) Bericht der Brit. Ass. 1886, p. 393.

KAPITEL V

STROMERSCHEINUNGEN

Elektrisches Beharrungsvermögen

38. Betrachten wir nun den Vorgang der Leitung im Allgemeinen, abgesehen von einer besonderen Art derselben, so gelangen wir zu folgendem Schluss. Wäre der elektrische Strom ein materieller Vorgang, so müsste er bis zu einem gewissen Grade Beharrungsvermögen besitzen; es müsste eine gewisse Zeit dauern, ehe er durch eine endliche Kraft in Bewegung gesetzt würde, und auch die Unterbrechung eines solchen Stromes könnte nur allmählich oder gewaltsam stattfinden. Wasser, das in einer Röhre steht, kann bekanntlich nicht ganz plötzlich in Bewegung gesetzt werden; ist es aber einmal in Bewegung, so braucht man, um es plötzlich aufzuhalten, eine so bedeutende Kraft, dass dadurch unter Umständen das Rohr zersprengt wird. Diese lebendige Kraft des Wassers wird unter Anderem beim hydraulischen

Widder verwerthet. Es liegt nun nahe, bei der Elektricität Aehnliches zu vermuthen und in der That werden sehr auffallende Erscheinungen dieser Art beobachtet. Der elektrische Strom setzt sich nicht sofort in Bewegung, sondern bedarf, um seine volle Kraft zu erlangen, einer gewissen, wenn auch gewöhnlich nur kurzen Zeit. Ist er einmal im Gange, so lässt er sich auch nicht plötzlich aufhalten, sondern durchbricht die etwa eingeführte, isolirende Scheidewand mit Gewalt und unter Erzeugung von Wärme. Diese Energie oder lebendige Kraft des elektrischen Stroms verursacht den Funken, der bei Unterbrechung des Stromkreises auftritt; je plötzlicher die Unterbrechung, je stärker der Funken.

Beide Wirkungen, die Verzögerung beim Schliessen und die lebendige Kraft beim Unterbrechen des Stromkreises, wurden früher Erscheinungen des „Extrastromes" genannt. Jetzt werden sie gewöhnlich als Wirkungen der „Selbstinduktion" bezeichnet.

Wir werden bald Näheres darüber erfahren; inzwischen erscheinen sie wie unmittelbare Folgen des Beharrungsvermögens der Elektricität. Jedenfalls könnte sich die Elektricität, wenn sie Beharrungsvermögen besässe, in den Augen eines oberflächlichen Beobachters nicht anders verhalten.

39. Besässe aber wirklich der elektrische Strom Beharrungsvermögen, wie der Wasserstrom, so würde sich dieses nicht blos in der oben besprochenen Weise zeigen,

sondern es müsste sich auch auf mechanische Art äussern. Eine beweglich aufgehängte Drahtspule würde z. B. jedesmal, wenn ein Strom in ihr geschlossen oder unterbrochen würde, einen drehenden Impuls erhalten. Eine Spule, durch die man einen konstanten Strom leitet, würde sich verhalten wie ein Kreisel oder ein Gyrostat und jeder Kraft Widerstand leisten, welche sie aus ihrer Ebene abzulenken suchte.

Clerk Maxwell hat sich bemüht diese letztere Wirkung nachzuweisen, aber ohne Erfolg. Er liess einen cardanisch aufgehängten Elektromagneten rasch um eine Achse rotiren, die sich zur magnetischen Achse senkrecht verhielt. Wäre die geringste gyrostatische Wirkung vorhanden gewesen, so hätte der Magnet um die dritte senkrechte Achse rotiren müssen; dies geschah jedoch nicht. Man kann sagen, dass eine der lebendigen Kraft ähnliche Wirkung bei dem elektrischen Strom durch *mechanische* Versuche noch nicht nachgewiesen worden ist. Vielmehr herrscht in dem Verhalten eines Kreisstroms oder elektrischen Wirbels und eines Kreisels nicht die geringste Uebereinstimmung. (§ 185.)

Ich habe noch eine andere von Maxwell vorgeschlagene Methode versucht. Ich schloss und unterbrach abwechselnd einen elektrischen Strom in einer frei aufgehängten Drahtspule, sowie in einer aufgehängten elektrolytischen Zelle [1]) und in einem kleinen Glimmer-

[1]) Ueber die Möglichkeit einer elektrolytischen lebendigen Kraft in Folge der verschiedenen Masse der entgegengesetzten Ionen, siehe Lodge, Phil. Mag. Nov. 1876.

kondensator, und bemühte mich in den Augenblicken, wo die Stromstärke wechselte, Rückschläge zu entdecken. Der Erdmagnetismus und die Anziehung und Abstossung zwischen den festen und beweglichen Theilen des Stromkreises verursachten anfangs täuschende Wirkungen; als diese jedoch vermittelst eines hinreichend dicken Schutzrings aus weichem Eisen und anderer zweckmässiger Vorrichtungen nahezu beseitigt waren, blieben keine wahrnehmbaren Wirkungen zurück. Diese Versuche waren keineswegs erschöpfend; aber sie beweisen doch, dass derartige Wirkungen, wenn sie überhaupt vorhanden sind, nur durch die feinsten Mittel nachgewiesen werden könnten.

Angenommen aber, dass auch die subtilsten Versuche ein negatives Ergebniss lieferten, so wäre damit durchaus noch nicht erwiesen, dass der elektrische Strom lebendige Kraft nicht besitzt. Man könnte beispielsweise annehmen, dass er eigentlich aus zwei gleichen, in entgegengesetzten Richtungen fliessenden Strömen bestehe, deren mechanische Wirkungen sich gegenseitig aufheben, während ihre elektrischen Wirkungen, d. h. die Erscheinungen der Selbstinduktion oder des Extrastroms, sich summiren würden. (§ 89.) Oder man könnte schliessen, dass seine Trägheit nur zu gering sei, um überhaupt beobachtet zu werden. Oder die ganze Erscheinung — das scheinbare Vorhandensein von Beharrungsvermögen bei einigen Versuchen und das Fehlen desselben bei anderen — müsste auf eine minder ein-

fache Art erklärt werden, auf die ich im Folgenden hinzuweisen gedenke.

Zustand des Mittels in der Umgebung eines Stroms

40. Bisher haben wir den elektrischen Strom als eine Erscheinung betrachtet, die sich nur im Innern der Leiter abspielt, ebenso wie das Strömen von Wasser, das durch eine Röhre fliesst, nur im Innern der Röhre vor sich geht. Es giebt jedoch eine Reihe von bemerkenswerthen Thatsachen, welche dieser Ansicht vollständig widersprechen. Wenn ein Strom sich fortbewegt, so strömt zwar ein Theil jedenfalls durch den Leiter; aber die Störung *beschränkt* sich nicht auf ihn, sondern sie verbreitet sich mehr oder weniger durch den umgebenden Raum.

Die dies beweisenden Thatsachen lassen sich nicht durch hydraulische Bilder wiedergeben, sondern müssen für sich behandelt werden. Sie lauten wie folgt:

(1) Eine Magnetnadel, die sich in der Nähe eines elektrischen Stroms befindet, wird dauernd abgelenkt, solange der Strom anhält.

(2) Zwei elektrische Ströme ziehen einander an oder stossen einander ab, je nachdem sie sich in denselben oder in entgegengesetzten Richtungen bewegen.

(3) Eine Drahtschleife, in der ein elektrischer Strom

kreist, strebt danach sich auszudehnen und einen möglichst grossen Raum einzuschliessen.

(4) Wenn eine solche Drahtschleife sich in einem magnetischen Feld befindet, strebt sie danach sich zusammenzuziehen, oder sich auszudehnen, oder sich aus ihrer Ebene zu verdrehen, je nach der Lage, die sie zu dem Magnetfeld einnimmt.

(5) Leiter, die sich in der Nähe eines Stromkreises befinden, unterliegen vorübergehenden elektrischen Störungen, sobald der Strom geschlossen, unterbrochen oder in seiner Stärke verändert wird.

(6) Dasselbe geschieht durch einen konstanten Strom, wenn man ihn dem Leiter nähert oder von ihm entfernt.

(7) Die scheinbar auf Beharrungsvermögen beruhenden Wirkungen der Selbstinduktion oder des Extrastroms lassen sich in einem besponnenen Draht nahezu aufheben, wenn man ihn doppelt nimmt oder besser, wenn man die direkte und die Rückleitung aufeinanderlegt; sie nehmen zu, wenn die Drahtschleife einen grösseren Raum umschliesst; sie nehmen noch mehr zu, wenn man den Draht zu einer festen Spule zusammenwickelt, und noch mehr, wenn man ein Stück Eisen in die Spule einführt.

Alle diese Erscheinungen kommen beim Wasserstrom nicht vor; sie beweisen, dass die Wirkungen des elektrischen Stroms sich keineswegs auf den Draht beschränken, sondern sich durch den Raum ver-

breiten und andere Körper auf bedeutende Entfernungen beeinflussen.

41. Fast alle diese Erscheinungen wurden von Ampère und Faraday entdeckt und von Letzterem als „Induktion" bezeichnet. Nach Faraday's Ansicht befindet sich das dielektrische Mittel, das eine Drahtschleife umgiebt, in demselben Zwangszustand, wie wenn es einen geladenen Körper umgiebt. Erstere Wirkung nennt man elektrostatische Spannung, letztere elektromagnetische oder elektrokinetische Spannung.

Während nun die elektrostatischen Erscheinungen ausschliesslich in dem Mittel selbst stattfinden und die Leiter nur Unterbrechungen darin bilden, deren Oberflächen zwar Ladungserscheinungen aufweisen, deren Masse aber vor jeder Störung geschützt ist, verhalten sich die elektrokinetischen Erscheinungen wesentlich anders. Diese beschränken sich ebensowenig auf das isolirende Mittel wie auf den leitenden Draht; sie finden in beiden statt, und zwar nicht blos, wie die elektrostatischen Erscheinungen, an der Oberfläche des Drahts, sondern in seiner ganzen Masse. Dies letztere wird bewiesen erstens dadurch, dass das Leitungsvermögen in demselben Verhältniss zunimmt wie der Querschnitt; zweitens dadurch, dass ein Leiter in allen seinen Theilen erwärmt wird; und drittens, bei Flüssigkeiten, durch ihre Zersetzung.

Zugleich aber erkennen wir an den nicht minder auf-

fallenden Erscheinungen der Stromanziehung und Induktion, dass der Strom auch auf das ganze umgebende Mittel einwirkt und dass seine Intensität von der Beschaffenheit dieses Mittels abhängt; wir können daher ganz unmöglich die Wirkungen der Selbstinduktion oder des Extrastroms zurückführen auf einfaches Beharrungsvermögen der Elektricität im Draht, wie wir es am Wasser in einer Röhre beobachten.

Hingegen drängt sich uns eine andere Vorstellung auf, durch welche diese Wirkungen erklärt werden könnten. Da nämlich die Molekeln eines Dielektricums unzertrennlich mit Elektricität verbunden sind und sich mit ihr bewegen, so wäre es denkbar, dass die Elektricität selbst gar kein Beharrungsvermögen besässe, sondern dass sie diesen Anschein dem Beharrungsvermögen der Atome des verschobenen Dielektricums verdankte. Manchmal ist dies wirklich der Fall, wie z. B. bei der oscillatorischen Entladung der Leydener Flasche. Es is nämlich ein charakteristisches Merkmal von Beharrungsvermögen, dass ein verschobener Körper über seine ursprüngliche Lage hinaus zurückschnellt und so lange oscillirt, bis seine Energie verbraucht ist. Auf diese Weise liessen sich vielleicht auch die Wirkungen der Selbstinduktion erklären. (§ 98.)

Es wird sich indessen empfehlen die nähere Betrachtung dieses schwierigen Gegenstandes erst im III. Theil wieder aufzunehmen. (§§ 48 und 88.)

Energie des elektrischen Stroms

42. Wir haben gesehen, dass die ganze Umgebung eines Stromkreises ein Kraftfeld ist, in dem sich viele der wichtigsten Eigenschaften des Stroms (die magnetischen vor Allem) bethätigen. Sobald wir aber den ganzen Raum in diesem Sinne betrachten, statt uns auf Drähte und Batterien zu beschränken, so entsteht sofort eine eigenthümliche Frage. Sollen wir uns vorstellen, dass der Strom in einem Leiter durch einen vom Ende aus wirkenden Druck fortbewegt wird, wie Wasser oder Luft in einer Röhre durch einen Kolben oder einen Ventilator; oder sollen wir uns denken, der Strom werde durch seitlich angreifende Kräfte fortbewegt, wie Wasser in einem Trog durch einen Luftstrom oder durch die Flügel eines Schaufelrades? War es richtig, an unseren Seilmodellen auf Fig. 5, 6 und 13 die treibende Kraft der Batterie so einwirken zu lassen, wie das Diagramm es veranschaulicht, oder hätten wir eine Methode ersinnen sollen, bei der die Kraft der Batterie etwa durch Treibriemen oder durch andere mechanische Einrichtungen dem Stromkreis von vielen Stellen aus zugeführt würde? Wirkt die treibende Kraft nur an einem Punkt auf die Elektricität ein, oder wird sie durch das Dielektricum jedem Theil der Drahtschleife mitgetheilt?

Prof. Poynting hat nachgewiesen, dass nach Maxwell's Principien letztere Annahme, obgleich sie komplicirter erscheint, dennoch die richtige ist; und er hat für gewisse Fälle die Bahnen berechnet, in denen die Energie von der Batterie aus den verschiedenen Punkten eines Stromkreises mitgetheilt wird.

Wir müssen also unterscheiden lernen zwischen dem Strömen von *Elektricität* und dem Strömen von elektrischer *Energie*; sie bewegen sich in verschiedenen Bahnen. Hier lässt uns die hydraulische Analogie, wenigstens in ihrer einfacheren Form, im Stich. Wenn eine Wasser- oder Dampfkraft durch eine Röhre befördert wird, so bewegt sich das Fluidum zusammen mit seiner Energie. Die Arbeit, welche geleistet wird, wenn man an einem Ende der Röhre Wasser einpresst, pflanzt sich längs der Röhre fort und erscheint am anderen Ende wieder als Arbeitsleistung des Kolbens. Anders verhält es sich bei der Elektricität. Elektrische Energie wird nicht an einem Ende des leitenden Drahts hineingepumpt, um am anderen Ende in gleicher Menge wieder auszuströmen. Auf diesem Wege wird *Elektricität* befördert — wie immer die Art ihrer Fortbewegung später erklärt werden sollte — nicht aber elektrische *Energie*. Die Batterie ertheilt ihre Energie nicht unmittelbar dem Draht, sondern dem umgebenden Mittel; dieses wird gestört, gespannt und pflanzt die Spannung fort, bis diese den Draht erreicht, durch den sie abgeleitet wird. Dies ist nämlich nach Prof. Poynting, der Zweck des Drahts:

er soll die Energie ableiten, die ihm das Medium zuführt, weil dieses sonst in einen statischen Zustand von Spannung gerathen und keine Energie mehr übertragen würde. Nur dadurch, dass die dem Medium ertheilte Energie beständig abgeführt und dabei in Wärme umgesetzt wird, ist eine dauernde Fortpflanzung von Elektricität möglich. (§ 107.)

Die Energie einer Dynamomaschine z. B. erreicht den entfernten Motor nicht durch die Drähte, sondern durch die Luft. Die Energie einer atlantischen Kabelbatterie erreicht Amerika nicht durch den Draht, sondern durch die isolirende Umhüllung. Diese Auffassung klingt seltsam und paradox, aber sie ist gut begründet.

Man denke sich eine Strassenbahn, die durch ein unterirdisches Seil bewegt wird, wie zum Beispiel in Chicago oder Highgate Hill. Eine aus dem Boden des Wagens herausragende eiserne Klaue erfasst das laufende Seil, das auf diese Weise den Wagen mitnimmt. Wie gelangt die Energie aus der feststehenden, entfernten Dynamo-Maschine in den Strassenwagen? Zweifellos durch das Seil und durch die Klaue. Beide müssen stark sein und werden durch den Zug, den sie übermitteln, abgenützt.

Nun denke man sich eine elektrische Strassenbahn, die den Strom aus einem unterirdischen Leiter empfängt, wie dies bei mehreren elektrischen Bahnen der Fall ist. Ein aus dem Boden des Wagens herausragender Draht

lässt einen kleinen Schlitten oder ein anderes gleitendes Kontaktstück auf dem Leiter schleifen, der auf diese Weise seine Elektricität dem mit den Rädern gekuppelten elektromagnetischen Motor mittheilt. Wie gelangt in diesem Fall die Energie aus der entfernten Dynamomaschine in den Strassenwagen? Weder durch den verbindenden Draht, noch durch den unterirdischen Leiter. Keiner von Beiden wird abgenutzt. Sie strömt von der entfernten Dynamomaschine aus durch das zwischen dem Kabel und der Erde befindliche isolirende Medium; ein kleiner Theil geht in den Leiter und wird abgeführt; der grössere Theil aber strömt weiter, sammelt sich in dem Motor des Strassenwagens und setzt diesen in Bewegung. Die Energie im Leiter wird in Wärme umgesetzt und geht verloren; was wirklich übertragen und benutzt wird, ist die Energie des isolirenden Mediums.

Wenn man zuviel Energie durch ein Drahtseil befördern will, so zerreisst es; ein Beweis, dass das Drahtseil selbst die Energie überträgt. Wenn man dagegen zuviel Energie durch ein elektrisches Kabel befördern will, so zerreisst nicht der Kupferdraht, sondern das isolirende Mittel. Die Hülle aus Guttapercha ist es, welche die Energie überträgt, und sie ist es auch, die bei übergrosser Spannung abgenutzt wird. Es kann allerdings vorkommen, dass der Draht schmilzt, wenn er ein Uebermaass von Energie abzuführen hat, wie die Halter eines rasch gleitenden Seiles glühend

werden, wenn sie nicht genügend eingefettet sind; aber auf diese Weise in Wärme umgesetzte Energie wird nicht übertragen; sie geht einfach unterwegs verloren.

Es ist interessant, die Bahnen zu verfolgen, in denen sich die Energie bei gewöhnlichen Maschinen bewegt. Bei Treibriemen wandert sie mit der Materie zusammen auf dem straffen Theil des Riemens; bei Wellen bewegt sie sich nicht in der Richtung der Materie, sondern längs der Rotationsachse; bei Zahnrädern bewegt sie sich weder mit noch senkrecht zu der Achse, sondern annähernd radial; ihre genauen Bahnen sind eingehend in Schriften über Kinematik (z. B. von Reuleaux) behandelt worden.

Auf die Art, wie elektrische Energie übertragen wird, werden wir im III. Theil wieder zurückkommen. (§ 105 ff.)

Erscheinungen, die dem Schliessen, Unterbrechen und Verändern eines Stroms eigenthümlich sind

43. Prof. Hughes hat uns vor Kurzem durch sinnreiche Versuche mit einer bemerkenswerthen Erscheinung bekannt gemacht, die bei Strömen von wechselnder Stärke auftritt. Ein Strom entsteht und vergeht nämlich nicht gleichmässig in dem ganzen Querschnitt eines Leiters, sondern er beginnt zuerst an der Ober-

fläche. Diese Erscheinung, die natürlich an dicken Drähten besser wahrnehmbar ist, als an dünnen, zeigt sich besonders auffallend bei Eisendrähten, aus Gründen, welche im III. Theil erklärt werden sollen; doch lässt sich die allgemeine Ursache, warum sie auch bei gewöhnlichem Kupferdraht auftritt, im Sinne der Ansichten von Prof. Poynting leicht erklären.

Wie erinnerlich, wird der Strom in einem Draht nicht fortbewegt durch eine Kraft, die an seinem Ende angreift. Er überwindet die Hindernisse also nicht vermittelst seines eigenen Beharrungsvermögens nebst einer treibenden Kraft. Vielmehr wird er an jedem Punkte seiner Bahn fortbewegt durch eine Kraft, die gerade ausreicht, um an diesem einen Punkt den Widerstand zu überwinden. Diese Kraft greift seitlich an durch das dielektrische Mittel, in dem sich der Draht befindet. Es ist daher begreiflich, dass sie auf die äusseren Schichten des Drahts zuerst einwirkt, da sie nur durch diese in das Innere gelangt. (§ 102.)

44. Um diesen Vorgang anschaulich zu machen, bringe man ein Glas Wasser in andauernde rotirende Bewegung und beobachte die Flüssigkeit, die man leicht bestäuben möge, um ihre Bewegung sichtbarer zu machen. Zuerst wird die äusserste Schicht in Bewegung gerathen, dann die zweite, die dritte und so weiter, bis die ganze Flüssigkeit sich in Umdrehung befindet. Man halte das Glas an und allmählich wird auch die Bewegung des Wassers auf-

hören; in umgekehrter Reihenfolge werden die Schichten wieder zur Ruhe kommen, die äussersten zuerst, die inneren Theile zuletzt.

Ist die Flüssigkeit zähe, wie Syrup, so verbreitet sich die Bewegung rasch; sie entspricht alsdann einem schlechten Leiter. Ist die Flüssigkeit sehr leicht beweglich, so pflanzt sich die Bewegung nur langsam nach innen fort, sie entspricht alsdann einem sehr guten Leiter. Wäre die innere Reibung der Flüssigkeit gleich Null, so würde diese einem vollkommenen Leiter entsprechen, und keine Bewegung würde tiefer eindringen als bis zur äussersten Schicht.

Man denke sich nun eine endlose mit Wasser gefüllte Röhre, etwa einen hohlen Radkranz oder den Rand eines Kreisels, und lasse sie rotiren. Die Flüssigkeit geräth bald in Bewegung, namentlich wenn die Röhre eng, oder die Flüssigkeit zähe ist; aber sie wird in Bewegung gesetzt durch eine seitliche Kraft, nicht durch einen am Ende wirkenden Druck, und ihre äusseren Schichten rotiren zuerst.

Ganz ebenso verhält es sich mit dem Strom in einem Draht.

Ist der Draht dünn oder leitet die Substanz schlecht, so entsteht der Strom überall fast gleichzeitig; ist der Draht aber ziemlich dick und aus einer gut leitenden Substanz, so entsteht der Strom in den äusseren Schichten merklich früher als in den inneren. Wäre der Draht unendlich leitend, so würde der Strom über-

haupt nur in der alleräussersten Schicht entstehen. (Siehe Kap. X und § 103.)

In Wirklichkeit ist die Zeit, in der sich die gesammte Elektricität in einem gewöhnlichen Draht in Bewegung setzt, ausserordentlich kurz — etwas weniger als $^1/_{1000}$ Sekunde. Will man daher die Erscheinung beobachten, so muss man den Strom oftmals umkehren.

45. Wenn man den oben gedachten hohlen Radkranz sich rasch hin und her drehen liesse, so würden begreiflicherweise nur die äusseren Schichten des darin enthaltenen Wassers hin und her bewegt werden, der innere Kern würde stillstehen; es würde demnach den Anschein haben, als ob die Röhre weniger Wasser enthielte, als sie in Wirklichkeit enthält. Thatsächlich würde die wirksame Weite der Röhre für viele Zwecke verringert sein. Dasselbe gilt für die Elektricität. Für einen Wechselstrom mit hoher Periodenzahl erscheint der Querschnitt eines Drahts thatsächlich verringert, wenn man ihn aus seinem Leitungsvermögen bestimmen will. Der scheinbare Widerstand eines Drahtes ist demnach grösser für Wechselstrom als für Gleichstrom. Die Wirkung ist jedoch zu gering, um im praktischen Gebrauch zur Geltung zu kommen, ausgenommen bei dicken Drähten und Wechselströmen von sehr hoher Periodenzahl.

Wie man sich erinnern wird, findet die Einwirkung der treibenden Kraft auf die Elektricität an der Grenze zwischen dem Dielektricum und dem Leiter statt;

je grösser man also diese Berührungsfläche macht, desto schneller und leichter geräth die Elektricität in Bewegung. Auch sollte der Leiter keinen unwirksamen inneren Kern haben, der zu weit von dem treibenden Dielektricum entfernt ist. Wenn man also den Leiter in ein Bündel isolirter Drähte auflöst und auf diese Weise dem Dielektricum Zutritt zu einer grösseren Oberfläche gewährt, so wird die Kraft viel ausgiebiger verwerthet, und die oben erwähnte drosselnde Wirkung wird erheblich vermindert. Denselben Zweck erreicht man, wenn man den runden Draht in ein flaches dünnes Band auswalzt. Macht man dagegen den Leiter hohl, so erreicht man nichts weiter, als dass man auf ein gegebenes Gewicht mehr Oberfläche erhält; denn die Energie wandert niemals in dem Hohlraum, sondern theilt sich stets von aussen mit, ausser wenn der Rückstrom längs der Achse des Hohlraums geleitet wird, wie beim Telegraphenkabel. Bei solcher Anordnung wandert die gesammte Energie zwischen beiden Leitern durch das Dielektricum und nicht auf der Aussenseite. Ich bitte zu bemerken, dass der Ausdruck „*aussen*", ähnlich wie bei der statischen Elektricität, nur mit Vorsicht angewendet werden darf; er bedeutet eigentlich die Seite eines Leiters, die einem anderen Leiter gegenüberliegt, der durch eine dielektrische Schicht von ihm getrennt ist.

46. Aus diesem Allem geht hervor, dass, während bei Gleichströmen der Querschnitt und die Substanz des

Leiters allein in Betracht kommen, die Dinge anders liegen bei schnellen Wechselströmen, wie sie bei dem Telephon, bei Entladungen der Leydener Flasche (siehe I. Th. p. 52) oder bei Blitzen vorkommen.

Bei diesen muss der Leiter dem treibenden Dielektricum eine möglichst grosse Oberfläche darbieten, wenn nicht ein grosser Theil davon unbenutzt bleiben soll.

Ein Blitzableiter müsste somit, soweit es sich um elektrische Erscheinungen handelt, nicht aus einem runden Stab, sondern aus einem flachen Metallstreifen oder einem Bündel von möglichst weit von einander entfernten Drähten bestehen. Daneben würden freilich die Fragen der Dauerhaftigkeit und der chemischen Abnutzung bei der praktischen Ausführung auch in Betracht zu kommen haben.

47. Es sei noch hinzugefügt, dass Eisen für Wechselströme ein ungemein viel schlechterer Leiter ist als Kupfer. Dieses gilt auch für Wechselströme von mässiger Geschwindigkeit, die nur einige hundert oder tausend Mal in der Sekunde wechseln, wie die Ströme einer Dynamomaschine oder eines Telephons. Ueberhaupt ist bei Eisen das Leitungsvermögen geringer und die drosselnde Wirkung ausgeprägter als bei Kupfer. Wenn aber die Geschwindigkeit der Oscillationen unermesslich gross ist, wie bei Blitzen und Entladungen der Leydener Flasche, dann leitet Eisen seltsamerweise ebensogut wie Kupfer. In diesem Fall beschränkt sich nämlich bei beiden Metallen der Strom auf die leitende Oberflächenschicht;

und obgleich diese bei Eisen entschieden dünner ist, als bei Kupfer, so sind doch die gesammten, auf andere Gründe zurückzuführenden Hindernisse so ungeheuer, dass die schwache, drosselnde Wirkung unwesentlich ist, und es nicht in Betracht kommt, woraus der Leiter besteht.

Abermals das elektrische Beharrungsvermögen

48. Wir sind jetzt in den Stand gesetzt zu der wichtigen Frage zurückzukehren: Besitzt der elektrische Strom Beharrungsvermögen wie eine materielle Flüssigkeit, oder nicht? Wir haben in Theil I § 7 bereits angedeutet, dass die Gesetze, nach denen der Strom in Leitern fliesst, oder besser, dass die Form seiner Strömungslinien, zu der Annahme berechtigen, er besitze entweder kein Beharrungsvermögen, oder keine Reibung. Dass er *Reibung* besitzt, beweist jedoch das Ohm'sche Gesetz. Es möchte demnach scheinen, dass ihm *Beharrungsvermögen* fehlen müsste.

Die Strömungslinien haben folgenden Bezug auf die Frage: Wenn man ein Hinderniss in fliessendes Wasser bringt, so sind die Bewegungen, die das Wasser vor und hinter dem Hinderniss ausführt, unsymmetrisch. Die Strömungslinien breiten sich aus, wenn sie an ein Hinderniss kommen, biegen um die Ecken und lassen dahinter einen mit Wirbeln erfüllten Raum zurück. (Fig. 14.)

Bringt man hingegen ein Hinderniss in einen elektrischen Strom, etwa indem man den leitenden Staniolstreifen durchlocht, so sind die Strömungslinien auf beiden Seiten vollständig symmetrisch, wie auf Fig. 15.

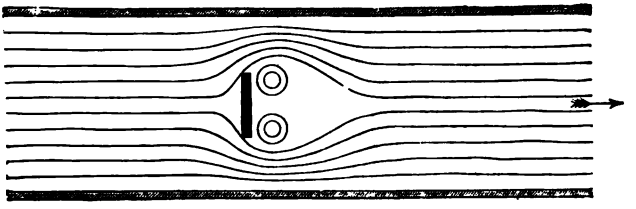


Fig. 14. — Strömungslinien des Wassers beim Hindurchfliessen durch eine Röhre, in der sich ein Hinderniss befindet.

Dasselbe würde auch vom Wasser gelten, wenn ihm entweder Reibung oder Beharrungsvermögen oder Beides fehlte.

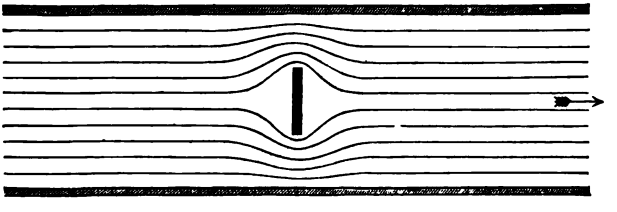


Fig. 15. — Elektrische Strömungslinien, an einem Hinderniss vorbeifliessend.

49. Ist dieser Umstand nicht entscheidend? Beweist er nicht, dass die Elektricität kein Beharrungsvermögen besitzt?

Die Antwort lautet: Nein. Er würde entscheidend sein, wenn man diese Art des Strömens auf keine andere Weise erklären könnte. Das ist aber möglich.

Wenn das Wasser nicht durch eine Kraft fortbewegt würde, die räumlich von dem Hinderniss entfernt ist — wenn es ihm nicht überlassen bliebe, seinem eigenen Schwung gehorchend, um die Ecken zu biegen oder vorüberzuschiessen — sondern wenn es an jedem Punkt seiner Bahn fortbewegt würde durch eine Kraft, die eben hinreichte, um an diesem einen Punkt die Reibung zu überwinden, dann würde der Wasserstrom dieselben Strömungslinien aufweisen, wie der elektrische Strom auf Fig. 15.

Ein solcher Fall lässt sich durch das Experiment sehr einfach herstellen. Man nehme ein flaches Stück Kupferdraht oder Blech, erwärme es ein wenig und bringe es in ruhige, raucherfüllte Luft. Man sehe bei heller Beleuchtung durch ein starkes Vergrösserungsglas daran entlang und man wird beobachten können, dass die erwärmte Luft, den Strömungslinien auf Fig. 15 genau entsprechend, an dem Metall vorbei in die Höhe steigt. Dies geschieht, weil die treibende Kraft von der Oberfläche des Metalls, nicht aber von einer weiter unten befindlichen Stelle ausgeht.[1]) Es lässt sich zwar nicht behaupten, dass die Kraft hier an jedem Punkt der Bahn angreift, aber sie greift doch

[1]) Siehe Lord Rayleigh, Nature, vol. 28, p. 139.

an den kritischen Punkten an, wo eine besondere Reibung stattfindet, und das Resultat ist nahezu dasselbe.

Die Strömungslinien auf Fig. 15 beweisen also nicht eine von zwei, sondern eine von drei Thatsachen: (1) das Fluidum besitzt entweder keine Reibung; oder (2) es besitzt kein Beharrungsvermögen; oder (3) es wird an jedem Punkt seiner Bahn fortbewegt.

Trifft eine dieser drei Thatsachen für die Elektricität zu, so ist keine der beiden anderen nöthig, um die Art, wie sie strömt, zu erklären. Aus § 42 haben wir ersehen, dass, nach Poynting's Auslegung von Maxwell's Theorie, der dritte der oben angeführten Sätze richtig ist: Die Elektricität wird an jedem Punkte ihrer Bahn fortbewegt. Demnach bleibt (siehe Th. I § 7) die Frage, ob sie eignes Beharrungsvermögen besitzt, bis auf Weiteres vollständig offen. (§§ 88, 89, 98.)

KAPITEL VI

CHEMISCHE UND THERMISCHE METHODEN, EINEN STROM ZU ERZEUGEN. LEITUNG IN GASEN

Galvanische Batterie

50. Wir behalten uns vor auf die soeben besprochenen Anschauungen im zehnten Kapitel von Theil III wieder zurückzukommen, und wenden uns nun zu der Frage: wie ist eine gewöhnliche Batterie oder Thermosäule im Stande, einen elektrischen Strom zu erzeugen? (Vgl. Kap. IV.)

Die Vorgänge in einem gewöhnlichen galvanischen Element sind leicht zu erklären, sobald man annimmt, dass zwischen den Atomen verschiedener Substanzen eine unerklärte chemische Anziehung bestehe. Zunächst haben wir eine Flüssigkeit. Diese enthält z. B. Wasserstoff- und Sauerstoffatome in freiem oder potentiell freiem Zustande; das heisst, die Atome sind entweder wirklich dissociirt, oder sie werden so beständig von Molekel zu Molekel ausgetauscht, dass sie bereit sind, dem schwäch-

sten Impulse in irgend einer Richtung zu folgen. (§ 33.) Jedes dieser freien Atome ist elektrisch geladen, und zwar der Wasserstoff mit einer bestimmten Menge positiver Elektricität, der Sauerstoff mit der doppelten Menge negativer Elektricität. In diese Flüssigkeit tauche man nun ein Plattenpaar aus zwei Metallen, welche auf die Atome eine verschieden starke Anziehung ausüben, zum Beispiel Zink und Kupfer. Beide ziehen den Sauerstoff an, Zink aber stärker als Kupfer. Statt des Kupfers nimmt man besser Platin, welches auf den Sauerstoff fast gar keine Anziehung ausübt. Noch besser wählt man Zink und Bleisuperoxyd, von denen das eine den Sauerstoff, das andere den Wasserstoff anzieht.

Sofort beginnen die freien Sauerstoffatome an dem Zink, die freien Wasserstoffatome an der anderen Platte emporzusteigen.

51. Wenn ich sage, die Metallplatten ziehen die Atome an, so verstehe ich darunter nicht eine Kraft, die auf sämmtliche in der Flüssigkeit enthaltene Atome einwirkt, sondern man hat sich eine Kraft zu denken, welche nur auf Atome einwirkt, die sich innerhalb der molekularen Wirkungssphäre der Metalloberfläche befinden — einer ausserordentlich kleinen, auf den zehnmillionsten Theil eines Millimeters geschätzten Entfernung. Hat sich die Zinkplatte mit allen Sauerstoffatomen in diesem Umkreis verbunden, so werden sie durch Diffusion aus der nächsten Schicht ersetzt, diese wieder

durch andere u. s. w. Auf diese Weise findet allmählich eine Wanderung sämmtlicher Sauerstoffatome nach dem Zink hin statt; die Geschwindigkeit dieser Wanderung hängt von der einwirkenden Kraft und von der Geschwindigkeit ab, mit der sich die Diffusion in der zur Verwendung gekommenen Flüssigkeit vollzieht.

Nun ist aber anzunehmen, dass diejenigen Atome, die sich mit dem Zink verbinden, diesem ihre negative Ladung mittheilen. Das Zink würde dadurch bald so stark negativ elektrisirt, dass seine Anziehungskraft für die gleichfalls negativ geladenen Sauerstoffatome aufhören und der ganze Vorgang ins Stocken gerathen müsste. Um dies zu vermeiden, wird die Elektricität durch einen Draht abgeleitet und zu einer in dieselbe Flüssigkeit eingetauchten Kupferplatte geführt. Auf diese Weise wird der Kreis geschlossen, die Elektricität strömt durch den Draht zurück, und die Wanderung nimmt ungestört ihren Fortgang. Zugleich hebt die negative Elektricität, die dem Kupfer oder Platin zugeführt wird, jede Anziehung auf, welche jene Metalle etwa auf die negativ geladenen Sauerstoffatome ausgeübt haben könnten, und trägt sogar dazu bei, die entgegengesetzte Wanderung der Wasserstoffatome zu befördern; diese theilen bei der Ankunft ihre Ladung dem Kupfer mit, verbinden sich mit einander und entweichen als Gas.

Diese Anschauungsweise von den Vorgängen in einem galvanischen Element bringt zwar nicht alle Einzel-

heiten zum Ausdruck, lenkt jedoch die Aufmerksamkeit auf das Wesentlichste der Erscheinungen.

52. Taucht man, statt verschiedener Metalle, zwei Platten aus *demselben* Metall in die Flüssigkeit ein, so wird man diese erst auf irgend eine Art entgegengesetzt elektrisiren müssen, um damit entgegengesetzte Wanderungen erzeugen und einen dauernden Strom in der Flüssigkeit erhalten zu können. Dies würde alsdann einem Voltameter gleichkommen. Bei dem Voltameter nehmen wir an, dass das Potentialgefälle zwischen beiden Platten, nicht blos auf die Ionen innerhalb der molekularen Wirkungssphäre der Elektrode einwirke, sondern auf *sämmtliche* in der Flüssigkeit enthaltene Ionen. In dieser Hinsicht unterscheidet sich das Voltameter offenbar von einem galvanischen Element, bei dem die treibende Kraft hauptsächlich in der chemischen Anziehung beruht, welche eine der beiden Platten auf einen der Bestandtheile der Flüssigkeit ausübt.

53. Von der bekannten Thatsache ausgehend, dass die Atome geladen sind, umgeht Helmholtz die Annahme einer chemischen (nicht-elektrischen) Anziehungskraft zwischen Zink und Sauerstoff, indem er sich vorstellt, dass alle Stoffe eine specifische Anziehung für die Elektricität selbst besitzen und dass Zink in dieser Hinsicht Kupfer und alle anderen Metalle übertrifft.

Das Zink zieht also nach seiner Ansicht nicht den Sauerstoff, sondern dessen elektrische Ladung an; hier-

durch wird die Aehnlichkeit zwischen einem Element und einem Voltameter noch grösser. Die Polarisation oder Gegenspannung an der Wasserstoff entwickelnden Elektrode erklärt er damit, dass der Wasserstoff positive Elektricität anziehe und seine Atome sich daher nur ungern von ihrer Ladung trennten.

Volta's sogenannte Kontaktkraft

54. Im Anschluss an diese Erklärung der Vorgänge in Batterien erscheint es zweckmässig auseinander zu setzen, auf welche Art elektrische Ladungen in Zink- und Kupferplatten durch vorübergehende gegenseitige Berührung hervorgerufen werden. Obwohl schon viel darüber geschrieben worden, ist die Sache doch höchst einfach.

Zink und Kupfer sind in der Luft genau denselben Bedingungen unterworfen, wie im Wasser. Der einzige Unterschied besteht darin, dass Wasser leitet, Luft hingegen isolirt. Solange Zink und Kupfer (oder ein anderes Metallpaar) einander nicht berühren, erfolgt in beiden Fällen nichts, weil das Bestreben zur chemischen Vereinigung auf beiden Platten nach allen Seiten gleich ist. Das Zink übt zwar eine ziemlich starke Anziehung auf den Sauerstoff aus, die geladenen Atome können sich aber unmöglich gleichmässig von allen Seiten nach dem Zink hinbewegen; denn sie würden dadurch einen

Leiter mit einer Elektricitätsart laden, ohne dass zugleich ein anderer Leiter die entsprechende, entgegengesetzte Ladung erhielte. (Siehe §§ 5, 3, 4, 14 A.) Ein Stück Zink, das gleichmässig auf allen Seiten mit geladenen Atomen umgeben ist, befindet sich in demselben Zustand, wie das Innere eines geladenen Leiters; von diesem wissen wir aber, dass keine Spur einer Ladung unter die oberste Schicht eindringen kann. Wenn die Atome sich nach dem Zink hinbewegten, so würden sie Elektricität in dasselbe hineinpressen, was unmöglich ist. So stark also auch die Anziehung ist, es wird dadurch nur der Druck der negativen Elektricität im Zink erhöht, oder ihre Spannung vermindert (um im Sinne der Seilmodelle Fig. 5, 6 etc. zu sprechen); mit anderen Worten das Potential des Zinks wird unter das Potential der benachbarten Luft herabgedrückt. Ganz dasselbe gilt in geringerem Grade von der isolirten Kupferplatte. Weder das eine noch das andere Metall wird geladen, solange die Bedingungen nach allen Seiten hin gleich sind.

Sobald sich aber die beiden Platten gegenseitig berühren, werden alle Sauerstoffatome zwischen ihnen hinweggedrängt und es wird der Elektricität eine freie Bahn vom Zink in das Kupfer erschlossen. Dies ist das Wesentliche bei der Berührung zwischen zwei Metallen: sie entfernt die spannenden Atome an einem Punkt und unterbricht dadurch die Gleichmässigkeit der äusseren Bedingungen. Wenn daher an der Be-

rührungsstelle zwischen beiden Metallen nicht etwa eine specifische elektromotorische Kraft entsteht — eine Annahme, die wir, soweit es sich um messbare Wirkungen handelt, aus triftigen Gründen *nicht* zulassen können — so wird sofort ein Erguss negativer Elektricität aus dem Zink in das Kupfer und ein Erguss positiver Elektricität in der umgekehrten Richtung stattfinden. Das Kupfer wird negativ, das Zink positiv geladen, und die Ladung entsteht dadurch, dass sämmtliche Sauerstoffatome sich dem Zink etwas nähern und sich vom Kupfer etwas entfernen. Der Vorgang bleibt bis dahin derselbe, gleichviel ob sich die Platten in angesäuertem Wasser oder in der Luft befinden.

Was zunächst geschieht, ist von dem verschiedenen Leitungsvermögen des Wassers und der Luft abhängig. Angesäuertes Wasser vermag Elektricität zu leiten, Luft nicht. Bei Platten, die sich in Wasser befinden, wird daher die negative Ladung durch die Flüssigkeit beständig von dem Kupfer nach dem Zink zurückbefördert; bei Platten, die sich in der Luft befinden, geschieht nichts. Es wird nur eine geringe elektrostatische Spannung der Luft durch die Menge von Elektricität bewirkt, die sich, als positive auf dem Zink, als negative auf dem Kupfer, ansammelt ohne abfliessen zu können.

Diese Ladungen sind ausserordentlich klein, wenn man nicht die Kapacität der freien Metalloberflächen durch grosse Ausdehnung der Flächen oder durch sehr nahe Berührung erhöht. Die elektromotorische

Kraft, die sie erzeugt, beträgt durchschnittlich weniger als 1 Volt; dementsprechend ist auch die Spannung der Luft in der Nähe von zwei einander berührenden Zink- und Kupferstäben ausserordentlich gering. Nichtsdestoweniger ist es Sir William Thomson gelungen, diese Spannung nachzuweisen, indem er eine stark geladene Aluminiumnadel in der Nähe einer solchen Berührungsstelle aufhängte; war die Nadel positiv geladen, so schlug sie merklich in der Richtung des Kupfers aus. Gebräuchlicher ist die von Volta zuerst angewandte Methode, die Erscheinung vorzuführen. Die Kapacität des Apparats wird dadurch erhöht, dass man zwei sorgfältig geschliffene Platten in sehr nahe Berührung bringt,. Die elektromotorische Kraft ist zwar sehr gering (nicht grösser als bei einem einzelnen Berührungspunkt), aber die Kapacität ist nunmehr so gross, dass sich eine ganz ansehnliche Menge Elektricität in den beiden Metallplatten ansammelt, die, durch eine mikroskopische Luftschicht getrennt, einander gegenüber stehen und sich nur an wenigen Punkten berühren. Werden die Platten vorsichtig getrennt, so findet sich darauf eine Ladung, die genügt, um eine merkliche Wirkung auf ein gewöhnliches Goldblatt-Elektroskop auszuüben.

55. Ein früher und auch jetzt noch häufig bei diesem Versuch begangener Irrthum besteht darin, diese Ladung als Beweis für eine am Berührungspunkte vorhandene elektromotorische Kraft anzusehen, welche eine

Spannung zwischen beiden Metallen verursache. Durch diese wollte man dann die Vorgänge in einem galvanischen Element erklären.

Richtiger ist es, das Element erst der Betrachtung zu unterwerfen und seine Wirkungsweise chemisch so weit zu erklären, als dies gegenwärtig angeht; und sich dann klar zu machen, dass in der Luft (oder eigentlich in einer Luftbatterie) ähnliche Vorgänge stattfinden dürften; mit dem Unterschiede, dass, da die Luft kein Elektrolyt sondern ein Dielektricum ist, auch kein fortdauernder Strom, sondern nur eine geringe elektrische Verrückung, nämlich der Volta-Effekt, eintreten wird.

56. Die Ursache des ganzen Phänomens besteht in beiden Fällen darin, dass der Sauerstoff grössere Affinität zu Zink hat als zu Kupfer. Diese Affinität an sich würde einen Druck der negativen Elektricität in der Richtung des Zinks — ein Nachlassen der negativen Seile im Zink, um mich im Sinne der Seilmodelle auszudrücken — und mithin eine Erhöhung des negativen Potentials bewirken. Das Potential einer isolirten Zinkplatte ist daher ungefähr 1.8 Volt unter dem Potential der Luft; der Potentialunterschied zwischen Metall und Sauerstoff lässt sich direkt aus der experimentell ermittelten Verbindungswärme von Zink und Sauerstoff berechnen.[1]) Dasselbe gilt vom Kupfer;

[1]) Siehe Lodge „On the seat of E. M. F. in the Voltaic Cell", Brit. Assoc. Report 1884; sowie Journ. Soc. Tel. Eng. 1885 und Phil. Mag., vol. 19, 1885 u. 1886.

nur ist hier die Spannung geringer, wie sich aus der geringeren Verbindungswärme von CuO im Vergleich zu ZnO ergiebt. Das Potential einer isolirten Kupferplatte ist daher nur ungefähr 0.8 Volt unter dem Potential der Luft.

Sobald sich die beiden Platten berühren, gleicht sich nothwendigerweise ihr Potential aus; denn alle Theile eines Leiters haben gleiches Potential, sofern nicht störende innere Kräfte vorhanden sind. Der Ausgleich vollzieht sich durch einen Erguss von Elektricität aus dem einen Metall in das andere, bei dem das Zink positiv, das Kupfer negativ geladen wird, bis das Potential dasselbe ist. In der Luft vollzieht sich dieser Ausgleich in einem Augenblick; im Wasser dauert er ewig: das ist der ganze Unterschied.

Die von Volta beobachtete Erscheinung ist kein *Potential*unterschied zwischen Zink und Kupfer, sondern ein Unterschied in der *Ladung*; beide Metalle sind in der Weise geladen, dass ihr Potential gleich ist, trotzdem sie verschiedene chemische Affinität zum Sauerstoff haben.

Auch bei der Versuchsanordnung von Sir William Thomson (§ 54) beobachtet man nicht einen Potentialunterschied zwischen Zink und Kupfer, sondern ein Potentialgefälle in der sie umgebenden Luft, in der Richtung vom Zink zum Kupfer. Beide Metalle haben nämlich, wenn sie sich berühren, dasselbe Potential, 1.3 Volt unter dem der Luft, das Mittel ihrer ursprünglichen Potentiale;

aber der ursprüngliche Potentialunterschied zwischen dem einzelnen Metall und der es berührenden Luft bleibt bestehen. Mithin entsteht ein Potentialgefälle von 1 Volt zwischen der Luftschicht, die mit dem Kupfer in Berührung ist, und der Luftschicht, die mit dem Zink in Berührung ist. Dieser Potentialunterschied ist es, auf den das Elektrometer reagirt. Das Diagramm 15 A trägt vielleicht dazu bei, das Gesagte deutlicher zu machen.

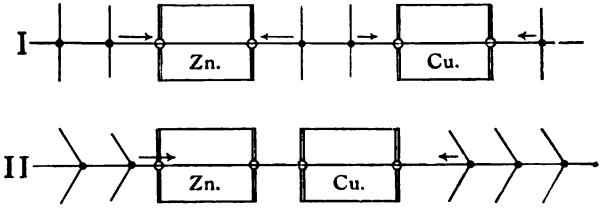


Fig. 15 A. — Diagramm des Volta-Effektes nach Analogie der Seilmodelle. (Fig. 5, 6, 7 etc.)

I. Zink und Kupfer vor der Berührung. Ein Seil, das durch beide hindurchgeht und negative Elektricität darstellt, nebst Kügelchen, die Sauerstoffatome darstellen. Die Pfeile zeigen an, dass der Sauerstoff vom Zink auf allen Seiten angezogen wird, und dass ihn auch das Kupfer, wiewohl schwächer, anzieht. Es besteht ein Potentialunterschied zwischen den Metallen untereinander und der Luft, die sie umgiebt, aber dieser Umstand bringt keine wahrnehmbaren Wirkungen hervor, solange die Metalle sich nicht berühren.

II. Sämmtliche Sauerstoffatome zwischen beiden Metallen sind nach erfolgter Berührung hinweggedrängt, sodass die grosse Ueberlegenheit des Zinks über das Kupfer im Anziehen von Atomen zur Geltung kommen kann, bis die durch eine elektrische Verrückung hervorgerufene elektrostatische Spannung sie wieder ausgleicht. Die Oberfläche des Zinks hat jetzt ein kürzeres Stück Seil als ihm zukommt, es ist positiv geladen; das Kupfer ist negativ geladen. Beide Metalle haben jetzt gleiches Potential, obwohl sie entgegengesetzt geladen sind; es besteht aber ein Potentialgefälle zwischen ihnen und der benachbarten Luft. Dieses ist die von Volta beobachtete Erscheinung.

Der Gegenstand ist dem Verständniss durchaus zugänglich und verdient, dass man einige Zeit und Mühe darauf verwendet.

Wirkliche Kontaktkraft

57. Bisher gingen wir davon aus, dass an der Berührungsstelle zwischen Zink und Kupfer eine elektromotorische Kraft *nicht* vorhanden sei. In der That ist auch eine beträchtliche Kraft dieser Art nicht vorhanden, aber sie ist auch nicht völlig gleich Null. Zwischen einigen Metallen, z. B. zwischen Wismuth und Antimon, ist sie sogar wesentlich grösser. Immerhin beträgt sie höchstens etliche Hundertstel eines Volt. Der Umstand, dass eine solche Kontaktkraft zwischen zwei Metallen vorhanden sein kann, ist wichtig, berührt aber in keiner Weise den auf chemischem Wege hervorgerufenen Volta-Effekt. Dieser ist, soweit er überhaupt als Kontaktkraft bezeichnet werden kann, eine Kontaktkraft zwischen dem Metall und der Luft; die wirkliche Kontaktkraft bewirkt nur eine unbedeutende Störung der einfachen, von Volta beobachteten Erscheinung und diejenige Wirkung, die wir bei dem Versuch mit dem Elektroskop wahrnehmen, ist eigentlich die Summe beider Kräfte.

58. Dass eine solche wirkliche, wenn auch schwache Kontaktkraft zwischen zwei Metallen vorhanden ist, beweisen die umkehrbaren Wärmeerscheinungen, die an der Berührungsstelle entstehen, wenn man einen Strom hindurchleitet. Der Strom erzeugt in der einen Richtung mehr Wärme als in der anderen. Bei einem ein-

fachen, homogenen Metall ist die durch einen Strom erzeugte Wärme ganz unabhängig von seiner Richtung; sie ist, wie Joule nachgewiesen hat, proportional dem Quadrat der Stromstärke. Aber an der Berührungsstelle zwischen verschiedenen Substanzen oder auch nur zwischen gleichen Substanzen, die verschiedenen Bedingungen, z. B. verschiedenen Temperaturen, unterworfen sind, entsteht neben der durch blossen Widerstand erzeugten eigentlichen Stromwärme eine Wärmeentwicklung, die mit der Richtung des Stroms ihr Vorzeichen wechselt, sodass der Strom in der einen Richtung danach strebt die Berührungsstelle zu erwärmen und in der anderen sie abzukühlen. Mit Vorsicht kann man diese abkühlende Wirkung benutzen, um die Stromwärme vollständig aufzuheben; ja, man kann Wasser am Berührungspunkt thatsächlich zum Gefrieren bringen, wenn man einen mässig starken Strom anhaltend in der richtigen Richtung hindurchleitet. Diese merkwürdige Thatsache wurde von Peltier entdeckt.

Sie kann als grundlegend für die Thermoelektricität betrachtet werden. Sie beweist, dass eine Kraft an der Berührungsstelle zwischen zwei Metallen vorhanden ist, die zur Fortbewegung der Elektricität beiträgt, mithin eine Arbeit leistet und dabei die eigene Wärme aufzehrt. Die Schwingungsbewegung der Molekeln wird verbraucht, um die Elektricität fortzubewegen. Die Kontaktkraft wirkt in der Richtung des Stroms und die Berührungsstelle wird dadurch abgekühlt.

Kehrt man den Strom um, so bewegt er sich der von den Molekeln ausgeübten Kraft entgegen, und es entsteht noch eine besondere Wärmemenge ausser der nicht umkehrbaren oder durch Reibung erzeugten Stromwärme.

59. Dieser thermische Beweis für das Vorhandensein einer Kontaktkraft ist zwar der direkteste, aber nicht der zuerst entdeckte. Das erste, was man über Thermoelektricität wusste, war, dass man in einem geschlossenen Kreis, der aus verschiedenen Metallen besteht, einen Strom erzeugen kann, wenn man den einzelnen Theilen verschiedene Temperatur ertheilt; offenbar weil die soeben besprochenen Kontaktkräfte von der Temperatur abhängig sind und theils schwächer, theils stärker werden, wenn die Temperatur steigt. In einem Kreis von durchweg gleicher Temperatur heben sie sich gegenseitig auf; sobald aber die Temperatur an einer Stelle sich ändert, haben sie eine Resultante; und diese resultirende elektromotorische Kraft erzeugt den von Seebeck zuerst beobachteten Thermostrom.

Thermosäule

60. Der Versuch, das Wesen dieser Vorgänge zu erklären, ist vorläufig noch nicht frei von mancherlei Unklarheiten, doch kann man sich von einer Thermosäule ungefähr folgendes Bild machen.

Wie wir gesehen haben, hat der elektrische Strom

bei seiner Wanderung mit oder zwischen den Molekeln eines Metalls einen gewissen Widerstand oder eine Gegenkraft zu überwinden, die seiner Geschwindigkeit genau proportional ist (§ 28). Mit anderen Worten, es besteht zwischen Stoff und Elektricität eine Beziehung, die in vielen Hinsichten der Reibung in Flüssigkeiten vergleichbar, die aber der ersten Potenz der relativen Geschwindigkeit proportional ist. Wenn daher ein Atom um einen festen Punkt schwingt, wird es danach streben, die Elektricität mit hin und her zu bewegen.

Da sich aber zahllose andere Atome desselben Körpers gleichzeitig in anderen Schwingungsphasen befinden, so können sie zusammen keinen bestimmten Impuls in irgend einer Richtung ausüben. In diesem Zustande befindet sich ein gewöhnlicher, warmer, fester Körper.

Wenn aber aus irgend einem Grunde ein System von Atomen sich schneller vorwärts bewegt als rückwärts, alsdann wird dieses unsymmetrisch schwingende System doch eine fortbewegende Kraft ausüben und die Elektricität vorwärtstreiben, aus dem einfachen Grunde, weil die ausgeübte Kraft proportional der Geschwindigkeit ist und daher auf dem Hinwege stärker wirkt als auf dem Rückwege. Um auf unser Seilmodell Fig. 5 zurückzukommen, so lehrt das Ohm'sche Gesetz, dass die Reibung zwischen dem Seil und den Kügelchen der Geschwindigkeit genau proportional ist; wenn daher

ein Kügelchen anfängt unsymmetrisch zu oscilliren, d. h. rasch vorwärts und langsam zurück zu schwingen, so bewegt es das Seil in derjenigen Richtung fort, in der es am schnellsten schwingt, ähnlich wie ein Kind sein Stühlchen vorwärtsschiebt, indem es damit auf einem rauhen Fussboden schaukelt.

Ich habe diese Erklärung so stehen lassen, wie sie in der ersten Auflage erschien, um auf einen Irrthum hinzuweisen, auf den mich Prof. Fitzgerald aufmerksam gemacht hat.

Wenn sich nämlich ein Kügelchen auf dem Hin- und Rückwege mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewegt und wenn es sich an einem Seil oder in einer Flüssigkeit befindet, deren Reibung sich genau verhält wie die erste Potenz der Geschwindigkeit, so wird es allerdings während der raschen Vorwärtsbewegung mehr Kraft auf das Seil ausüben als während der langsamen Rückwärtsbewegung, wie oben gesagt wurde. Betrachten wir aber die von den hin- und herschwingenden Kräften ausgehenden Impulse genauer, so stellt sich heraus, dass sie in beiden Richtungen gleich sind; denn was der langsameren Schwingung an Kraft abgeht, das ersetzt die längere Dauer; und ein „Impuls" ist das Product von Kraft und Zeit. Es scheint also, dass einfache Asymmetrie der Bewegung nicht hinreicht, um jene Wirkung von Widerhaken oder Ventilen hervorzubringen, auf die wir oben die thermo-elektrischen Kräfte zurück-

zuführen versuchten.[1]) Eine Asymmetrie der Bewegung muss vorhanden sein und ist wahrscheinlich auch die Ursache der thermo-elektrischen Kräfte; aber in welcher Weise sie wirkt, das bedarf vorläufig noch der Erklärung.

Es wäre höchstens zu bemerken, dass wenn die Kraft der Reibung schneller variirte als die erste Potenz der Geschwindigkeit, ein Antrieb in der einen Richtung und, wenn sie langsamer variirte, ein Antrieb in der entgegengesetzten Richtung erfolgen würde.

Ueberall, wo Wärme in einer Substanz fortgeleitet wird, ist die Bewegung der Atome asymmetrisch. Sie werden rascher vorwärts bewegt als rückwärts, weil die Atome am warmen Ende hinter ihnen rascher schwingen als die Atome vor ihnen am kalten Ende. Und ein solches Temperaturgefälle übt, was auch die Ursache sein möge, eine fortbewegende Wirkung aus; also muss in einer ungleichmässig erwärmten Substanz eine elektromotorische Kraft entstehen.

Diese Thatsache wurde theoretisch entdeckt und durch den Versuch bestätigt von Sir William Thomson.

61. Eine solche Kraft entsteht jedoch nicht allein an der Berührungsstelle zwischen den kalten und den warmen Theilen einer Substanz; sie entsteht auch an der Berührungsstelle zwischen zwei verschiedenen Substanzen, selbst wenn deren Temperatur gleich ist. Obwohl

[1]) Siehe auch Lodge, Philosophical Magazine, December 1876.

es nicht ganz ersichtlich ist, weshalb bei dieser Art der Berührung die Atome sich rascher in einer Richtung bewegen sollten als in der anderen; so ist doch die Sache nicht unwahrscheinlich, wenn man die Zwangszustände in Betracht zieht, die nothwendigerweise an der Grenzoberfläche zwischen zwei verschiedenen Mitteln bestehen müssen. Wie dem aber auch sei, es entsteht an einer solchen Berührungsstelle eine elektromotorische Kraft.

Wir finden also in einem einfachen Kreis aus zwei Metallen, deren Löthstellen verschiedene Temperaturen haben, im Ganzen vier elektromotorische Kräfte: eine in jedem Metall, in der Richtung vom heissen zum kalten Ende oder umgekehrt, und eine an jeder Löthstelle. Der Strom, der in einem solchen Kreise fliesst, wird fortbewegt durch die Resultante dieser vier Kräfte.

Diese vier Kräfte, zwei Thomson'sche in den Metallen und zwei Peltier'sche an deren Berührungsstellen, können den Strom theils fördern, theils hemmen. Da, wo sie ihn fördern, wird die Stelle entsprechend abgekühlt, da, wo sie ihn hemmen, wird sie erwärmt.

Reibungselektricität

62. Die Kontaktkraft beschränkt sich indessen keineswegs auf Metalle. Sie entsteht auch zwischen Isolatoren und ist die Ursache der auffallenden Wirkungen sämmt-

licher Reibungs-Elektrisirmaschinen. Das Wesentliche bei der Erzeugung von „Reibungselektricität" ist nämlich die gegenseitige Berührung zwischen verschiedenartigen Substanzen. Die dadurch hervorgerufene Kontaktkraft überträgt die Elektricität von einem Körper auf den anderen, sodass der eine positiv, der andere negativ geladen wird. Weil aber die Substanzen schlecht leiten, so bedarf es, um der Uebertragung nachzuhelfen, gewöhnlich einer raschen Folge von Berührungen, wie man sie leicht durch Gegeneinanderreiben der Oberflächen erzielen kann.

Wenn also die als Widerstand bekannte und durch Ohm's Gesetz (§ 28) präcisirte Beziehung zwischen Elektricität und Materie im Stande ist, Kontaktkräfte hervorzurufen, so erklärt es sich auch, weshalb diese Kräfte in guten Leitern so schwach, in Isolatoren so stark sind. Die Elektricität schlüpft den Metallen gleichsam durch die Finger und kann nur eine sehr geringe treibende Kraft ausüben; Isolatoren dagegen halten sie fest und drängen sie mit Gewalt vorwärts. Aus obiger Anschauungsweise folgt, dass in vollkommenen Leitern sowohl thermo-elektrische als alle anderen Kontaktkräfte gleich Null sein müssten.

Specifische Beziehung zwischen Materie und Elektricität, manchmal „specifische Wärme der Elektricität" genannt

63. Die verschiedenen Metalle unterscheiden sich in ihrer Fähigkeit, Elektricität festzuhalten. Im Ganzen genommen sind die besten Leiter die schlechtesten thermo-elektrischen Körper. Umgekehrt bildet ein schlechter Leiter, wie Antimon oder besser noch Bleiglanz, Selen oder Tellur ein viel wirksameres thermoelektrisches Element als ein gut leitendes Metall. Allein es handelt sich dabei nicht blos um den specifischen Widerstand; daneben besteht noch eine besondere Beziehung der einzelnen Metalle zu beiden Elektricitätsarten. So ist z. B. Eisen ein Metall, dessen Atome positive Elektricität fester halten als negative, daher bewegt sich im Eisen ein positiver Strom von dem heissen zum kalten Ende. Kupfer dagegen hat die umgekehrte Eigenschaft, daher fliesst im Kupfer vom heissen zum kalten Ende ein negativer Strom. Alle anderen Metalle lassen sich in diese beiden Kategorien einreihen, mit Ausnahme vielleicht von Blei, das beide Elektricitätsarten gleich fest zu halten scheint und daher keine verschiedenen Wirkungen auf sie ausübt.

In wiefern diese Beziehung als „specifische Wärme" aufgefasst werden kann, wird man begreifen, wenn man den letzten Abschnitt des § 61 aufmerksam durchliest

und die Elektricität als materielles Fluidum betrachtet (siehe auch § 182). Doch hat diese Anschauungsweise sehr wenig für sich.

Pyro-Elektricität

Gewisse Krystalle, die an den beiden Enden ihrer Achse, *A* und *B*, verschieden gestaltet sind, werden in der Mineralogie als hemiëdrisch bezeichnet. Sie zeigen in der Richtung *A B* andere Eigenschaften, als in der Richtung *B A*, lassen sich z. B. in der einen Richtung leichter ritzen als in der anderen. Diese Krystalle, für welche die Klasse der Turmaline als typisch gelten kann, haben noch andere merkwürdige Eigenschaften. Die durchsichtigen unter ihnen sind undurchlässig für Licht, das in gewissen Ebenen polarisirt ist. Es werden nämlich die Schwingungen ausgelöscht, die senkrecht zur Achse auffallen, sodass ein senkrecht zur Achse geschnittenes Stück ganz undurchsichtig erscheint; während Schwingungen längs der Achse nur einer mässigen Absorption unterliegen. Diese Undurchsichtigkeit scheint etwas ganz anderes zu sein als die Undurchsichtigkeit der Metalle gegen elektrische Schwingungen, von der später die Rede sein wird; denn erstens wird das aufgehaltene Licht nicht reflektirt, sondern absorbirt, und zweitens ist ein Turmalinkrystall kein Leiter, sondern ein recht guter Isolator.

Dennoch ist das geringe Leitungsvermögen, das er besitzt, von sehr bemerkenswerthen Eigenthümlichkeiten begleitet, die *vielleicht* in naher Beziehung zu jener partiellen Undurchsichtigkeit stehen, welche ein parallel zur Achse geschnittenes Krystallstück zu einem optisch brauchbaren „Polarisator" macht. Eine dieser Eigenthümlichkeiten entdeckte Herr S. P. Thompson gemeinschaftlich mit dem Verfasser. Während nämlich, wie bei allen einachsigen Krystallen, das thermische Leitungsvermögen in axialer und tangentialer Richtung verschieden ist (beim Turmalin ist es in axialer Richtung schwächer), leitet ausserdem noch ein sich erwärmender Krystall die Wärme besser in der Richtung BA als in der Richtung AB; ein sich abkühlender Krystall verhält sich umgekehrt. Bei steigender Temperatur wird die Wärme leichter in der Richtung A als in der Richtung B befördert.[1])

Dasselbe gilt von der Elektricität entweder in Folge der eintretenden Temperaturverschiedenheiten, oder aus irgend einem direkten Grunde. Wenn daher ein Krystall erwärmt wird, sammelt sich die positive Elektricität am Ende A und die negative am Ende B. Solange die Temperatur konstant bleibt, ereignet sich weiter nichts, ausser dass, hauptsächlich wohl an der Oberfläche, Verluste eintreten, die mit der Zeit die ganze Erscheinung entstellen können. Wird der Krystall abgekühlt, so tritt eine umgekehrte Elektrisirung

[1]) Phil. Mag. Juli 1879.

ein; oder wenn kein Verlust stattgefunden hat, stellt die Abkühlung einfach das Gleichgewicht wieder her.

Bei gleichmässiger Temperatur des Krystalls konnte der Verfasser eine Verschiedenheit des elektrischen Leitungsvermögens in den Richtungen AB und BA nicht wahrnehmen. Auch das thermische Leitungsvermögen ist in beiden Richtungen gleich, solange die Temperatur unverändert bleibt. Beide Erscheinungen hängen ab vom Temperaturwechsel. Aber die elektrische Erscheinung ist mehr als das unilaterale Leitungsvermögen, sie ist eine echte, axiale, elektromotorische Kraft.

Fortpflanzung der Elektricität in Gasen

64. Schliesslich haben wir uns noch mit der Frage zu beschäftigen, auf welche Art die Elektricität durch Gase befördert wird.

Zunächst ist zu bemerken, dass die Gase und Dämpfe, welche Elektricität leiten, unterschieden werden müssen von denen, die sie nicht leiten. Die leitenden Gase verhalten sich wie Elektrolyte, d. h. es findet wie bei den Flüssigkeiten, eine Wanderung geladener Atome oder *Ionen* statt; und man hat Grund anzunehmen, dass Gase, welche im Stande sind, Elektricität zu leiten, sich in einem Zustande der Dissociation befinden. Eine hohe Temperatur oder eine kürzlich erfolgte

Entladung, beides wohlbekannte Mittel zur Herbeiführung der Dissociation, verleihen sogar einigen Gasen und Dämpfen ein Leitungsvermögen, denen es in normalem Zustande fehlt.

Nichtdissociirte Gase scheinen dagegen überhaupt nicht zu leiten; mit anderen Worten: ein Stoff in diesem Zustande verhält sich wie ein vollkommener Isolator — vielleicht der einzig vollkommene, den es überhaupt giebt. Wasserdampf, sogar Quecksilberdampf leitet nicht im Allergeringsten. Das blosse Bombardement der Molekeln, das bekanntlich in Gasen stattfindet, reicht also nicht hin, um eine elektrische Ladung fortzunehmen oder zu übertragen. Schuster und J. J. Thomson haben indessen nachgewiesen, dass wirklich einige Gase elektrolytisch leiten, und Schuster schildert mehrere merkwürdige Thatsachen, die mit dem Leitungsvermögen von Gasen während und unmittelbar nach einer elektrischen Entladung zusammenhängen. Ueber leitende Gase siehe § 65 d.

Die gewöhnliche Art, wie Elektricität in nichtleitenden Gasen befördert wird, besteht, abgesehen von der rein mechanischen Uebertragung durch feste Körper, in einer von Durchschlagen begleiteten Entladung. Diesen Vorgang wollen wir uns bemühen etwas näher kennen zu lernen.

Da die Molekeln eines Gases sich ebenso frei bewegen können wie die Molekeln irgend eines anderen Fluidums, so drängt sich zu allererst die Frage auf:

weshalb leiten Gase nicht elektrolytisch wie Flüssigkeiten? Nun schienen zur Elektrolyse in einer Flüssigkeit zwei Bedingungen zu gehören: erstens mussten die Atome oder Radicale einer Molekel entgegengesetzt geladen sein; und zweitens mussten sie sich (durch Dissociation oder sonstwie) in einem Zustande befinden, in dem ein Austausch der Atome von Molekel zu Molekel oder sonst eine Art von Atomwanderung in einer gegebenen Richtung durch eine unendlich schwache Kraft bewirkt werden konnte.

Da die meisten Gase *nicht* elektrolytisch leiten, so entsprechen sie offenbar einer oder beiden dieser Bedingungen nicht. Entweder die Atome einer Gasmolekel sind nicht geladen, was bei einfachen Gasen wahrscheinlich ist, oder. die Atome einer Gasmolekel gehören individuell zu der Molekel und lassen sich nicht beliebig austauschen. Die Molekeln sind dann unabhängig von einander und unterliegen nicht der doppelten Umsetzung.

Wenn wir sagen, dass ein Gas sich nicht verhält wie ein gewöhnlicher Elektrolyt, so stützen wir diese Behauptung auf die Erfahrung, dass eine endliche, elektrostatische Spannung im Innern eines Gases möglich ist; diese Spannung kann sogar einen sehr hohen Grad erreichen; überschreitet sie die Grenze und zwingt das Mittel zum Nachgeben, so tritt keine stetige, gleitende Verrückung oder Wanderung der Atome ein, sondern es findet ein gewaltsamer Durchbruch statt, der

von der ungenügenden Widerstandskraft des Mittels herrührt. Man kann sich also die Molekeln eines Gases zwischen zwei Elektroden oder Polen unter hoher Spannung so angeordnet denken, als wären sie durch eine Reihe von parallelen Ketten mit einander verbunden und so stark gespannt, dass sie nahe daran wären auseinandergerissen zu werden. Die einzelne Molekel braucht dabei nicht als feststehend gedacht zu werden; es kann ein starker Luftzug zwischen den Elektroden wehen; aber alle Molekeln sind der Spannung unterworfen, sobald sie in das Kraftfeld eintreten, und werden nicht eher davon befreit, als bis sie es verlassen. Siehe § 65 b.

65. Wenn das Potentialgefälle eine gewisse Grenze überschreitet, die für gewöhnliche Luft durch den Versuch zu ungefähr 33 000 Volt pro cm bestimmt worden ist, so geben die Molekeln nach; die Atome stürzen sich mit ihren Ladungen auf die Elektroden und die Entladung hat stattgefunden. Hierbei wird eine so grosse Zahl von Atomen losgerissen und in Stand gesetzt, eine Ladung zu befördern, dass es niemals die geringste Schwierigkeit macht, beliebige Elektricitätsmengen auf diesem Wege zu übertragen. Mit anderen Worten, das Gas wird *während* der Entladung zum Leiter und kann, da es durch Atomwanderung leitet, als Elektrolyt bezeichnet werden.

Schuster hat entdeckt, dass dieses so erlangte Leitungsvermögen der Gase oder diese Fähigkeit, selbst

sehr schwache Spannungen auszugleichen, eine Zeit lang anhält und sich auch über die nähere Umgebung einer Entladungsstelle verbreitet; als ob eine Anzahl von Ionen oder geladenen Atomen losgerissen oder versprengt worden wäre und sich erst allmählich wieder vereinigte und gegenseitig neutralisirte.

Ob aber die elektrische Ladung jedem dieser Atome bereits von Anfang an innewohnte, oder ob sie den Bestandtheilen der Molekeln erst während der Spannung und Entladung mitgetheilt wurde, ist eine noch nicht entschiedene Frage.

Was man als die „dielektrische Festigkeit" eines Gases bezeichnen könnte, d. h. der Grad der Spannung, den es ertragen kann ohne nachzugeben und vorübergehend zum Leiter zu werden, hängt theils von der Beschaffenheit des Gases, hauptsächlich aber von seinem Druck ab. Im Ganzen genommen kann man sagen, dass Gase unter hohem Druck sehr fest sind, Gase unter geringem Druck sehr schwach. Ein gewöhnlicher Elektrolyt wäre demnach ein Dielektricum, dessen Festigkeit gleich Null ist.

Ein Grund, weshalb die dielektrische Widerstandsfähigkeit der Gase vom Druck abhängt, liegt auf der Hand. Er ist zwar wohl nicht der einzige, aber doch wenigstens zum Theil sicherlich der wahre Grund. Es ist die Thatsache, dass bei verdünnten Gasen die Spannung sich auf eine geringe Zahl von Molekeln vertheilt.

Wenn wir z. B. 40000 Volt pro cm als nöthig annehmen, um gewöhnliche Luft zu durchschlagen, so werden 40 Volt pro cm genügen, um eine Entladung durch Luft, die unter einem Druck von ungefähr $^3/_4$ mm Quecksilber steht, herbeizuführen; dagegen würden bei einem Druck von 50 Atmosphären 2000000 Volt pro cm erforderlich sein.[1])

65a. Leitung durch zuvor nicht dissociirte Gase ist wahrscheinlich in allen Fällen auf einen ähnlichen Vorgang zurückzuführen, wie den am Schluss des § 64 angedeuteten, nämlich auf die Bildung molekularer Ketten, wie Grotthus sie zur Erklärung der gewöhnlichen Elektrolyse annahm, und auf die Zersprengung dieser Ketten, wenn die Spannung einen bestimmten Grad erreicht hat. Dabei sind drei Hauptklassen zu unterschieden:

(1) Die Ketten erstrecken sich bereits vorher längs der ganzen Bahn, welche die Entladung nachher einschlagen wird, wie bei einem zwischen ebenen Platten überspringenden Funken.

(2) Die Ketten bestehen nur in der Nähe der Elektrode, von der die Entladung ausgeht; es bilden sich aber fortwährend neue Ketten, da die entladene Elektricität im Fortschreiten selbst zur Elektrode wird, an

[1]) Allerdings ist die Spannung der Flächeneinheit und die Energie der Raumeinheit proportional dem *Quadrat* des Potentialgefälles; ich lege auch auf das oben eingeführte einfache Verhältniss kein Gewicht. Es lässt sich über diesen Gegenstand noch sehr viel sagen; siehe Lodge, Brit. Assoc. Report 1885 pp. 760–2.

die sich neue Systeme von Ketten ansetzen. — Beispiel: Geschichtete Entladung zwischen kleinen, weit von einander entfernten Elektroden.

(3) Die Ketten sind nur in unmittelbarster Nähe der sich entladenden Elektrode vorhanden und die Elektricität wird auf dem übrigen Wege von denjenigen Atomen übertragen, die beim Zerreissen der Ketten am äusseren Ende derselben frei werden. Auf diese Art vollzieht sich, meiner Ansicht nach, die Entladung von scharfen Spitzen auf entfernte Platten.

Diese Theorie der molekularen Kettenbildung bei Entladung in Gasen findet ihre beste Stütze in dem Umstand, dass sie von allen bisher vorgebrachten Theorien die einzige ist, die viele der auffallendsten Eigenschaften einer solchen Entladung in einfacher und zusammenhängender Weise erklärt.

So nimmt z. B. bei Funkenerscheinungen zwischen ebenen Platten die zur Funkenerzeugung erforderliche Feldstärke zu, wenn die Entfernung zwischen den Platten abnimmt, und zwar ganz ausserordentlich schnell, sobald die Entfernung weniger als 1 mm beträgt. Dies scheint fast unerklärlich, solange man sich die Gasmolekeln als durchweg frei und unabhängig von einander vorstellt. Nimmt man dagegen an, dass sie Ketten bilden, so ist die Erklärung leicht. Denn eine Kette ist das Resultat eines Gleichgewichts zwischen zwei entgegengesetzten Bestrebungen: dem Bestreben, unter der Einwirkung des Feldes zusammenzuhalten, und dem Bestreben, unter

dem molekularen Bombardement der umgebenden Gasmolekeln zu zerfallen. Dieses zersetzende Bombardement wird in einiger Entfernung von der Platte stärker sein, als in ihrer Nähe, weil die Platte, deren eigene Molekeln relativ ohne Bewegung sind, als eine Art Schirm wirkt und den Ketten eine feste Grundlage gewährt, auf der sie sich verankern können. Mithin werden die Ketten sämmtlich von den Platten ausgehen, und da sie von sehr verschiedener Länge sind, werden sie in der Nähe der Platte zahlreicher sein als in einiger Entfernung; die allerwenigsten werden ganz hinüberreichen. Diese wenigen Ketten werden in der Mitte des Kraftfeldes die gesammte Spannung zu tragen haben; sie werden also in einem Feld von gegebener Stärke eine grössere Anzahl von Kraftlinien aufnehmen, mithin dem Zerreissen näher sein, wenn die Platten weit von einander entfernt als wenn sie nahe zusammen sind, da in letzterem Falle die Kraftlinien sich auf eine grössere Anzahl von Bahnen vertheilen werden.

Ferner hat Herr J. J. Thomson bei Entladungen zwischen weit von einander entfernten Elektroden unter Bildung von Schichtungen (Fall 2) nachgewiesen [1]), dass die Geschwindigkeit der Entladung der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar ist, obwohl wir unmöglich annehmen können, dass Atombewegungen auch nur annähernd diese Geschwindigkeit besitzen. Diese scheinbare Schwierigkeit überwindet er durch die

[1]) J. J. Thomson, Phil. Mag. Aug. 1890.

Annahme, dass die Ketten vor der im Fortschreiten begriffenen Entladung beständig neu entstehen und wieder zerreissen. Jede Zerreissung findet nämlich fast gleichzeitig an allen Stellen der Kette statt, wenn sie bricht, und befördert daher die Entladung mit fast unendlicher Geschwindigkeit eine endliche Strecke vorwärts — Zeit ist nur erforderlich zur Bildung der Ketten. Wenn die Entladung sich also Ketten von geeigneter Länge aussucht und dadurch die Zerreissungen zeitlich zweckmässig eintheilt, so kann sie sich mit derselben ungeheuern Geschwindigkeit fortbewegen, wie das Licht, ohne dass man gezwungen wäre, ein ungewöhnlich schnelles Wandern der einzelnen mit Elektricität beladenen Atome anzunehmen. Die Elektricität bewegt sich nach dieser Hypothese in Sprüngen und Sätzen, und die verschiedenen Ausgangspunkte dieser Sprünge — die Stellen wo eine Kette aufhört und die andere anfängt — werden durch die Schichtungen bezeichnet.

Bei der Entladung von einer Spitze auf eine Platte endlich (Fall 3) ist das Feld überall ausserordentlich schwach, ausgenommen dicht bei der Spitze, sodass weder Funken noch geschichtete Entladung möglich ist. Nichtsdestoweniger bilden sich doch höchst wahrscheinlich in dem starken Feld in der Umgebung der Spitze Ketten und führen durch Zerreissen die Entladung herbei. Denn die Beobachtung hat gelehrt [1]),

[1]) A. P. Chattock, Phil. Mag. September 1891.

dass in der Nähe einer Spitze die Feldstärke im Augenblick der Entladung rasch steigt, wenn die Abrundung der Spitze zunimmt. Dass ferner[1]) die Feldstärke mit der Abnahme des Gasdrucks bis zu einem Minimum fällt und dann wieder steigt, wenn der Gasdruck weiter vermindert wird, erklärt sich leicht aus Veränderungen der Kettenlängen, die infolge der veränderten Bedingungen eintreten müssen.

Sind dann die End-Atome solcher von Spitzen ausgehenden Ketten in das Gas hineingeschleudert worden, so werden sie verhältnissmässig langsam darin weiter befördert. Wenigstens ist dies nach einem kürzlich von Lehmann[2]) ausgeführten Versuch sehr wahrscheinlich. Er lässt die Entladung von einer Spitze auf eine mit Seide umhüllte Metallplatte übergehen. Die Seide wird an der Stelle, wo die Entladung sie trifft, schwach leuchtend. Jetzt richtet er einen starken Luftstrom im rechten Winkel gegen die Bahn der Entladung — und zeigt, dass die leuchtende Stelle sich in der Richtung des Luftstroms verschiebt. Auf die Bahn eines gewöhnlichen Funkens dagegen würde der Luftstrom keine Wirkung ausüben.

65b. Aber obgleich die Ketten viele Eigenschaften leitender Gase erklären, genügen sie an sich nicht, um über die sehr ausgeprägten Unterschiede zwischen dem Ueberströmen positiver und negativer Elektri-

[1]) Röntgen, Wiedemann's Elektricität, vol. 4 § 582.
[2]) Lehmann, Wiedemann's Annalen, 44. 645 1891.

cität von einer Elektrode zur anderen Aufschluss zu geben.

Wenn z. B. Funken von einer Spitze auf eine Platte überspringen (was man veranlassen kann, indem man das Potential genügend schnell erhöht), so sind sie für eine gegebene Spannung länger, wenn die Spitze die Anode als wenn sie die Kathode ist. Wenn ferner die Platte positiv ist, neigt der Funken dazu, von der Spitze auf den Rand der Platte überzuspringen, statt den kürzesten Weg nach der Mitte einzuschlagen, den er wählt, wenn die Platte negativ ist. Es scheint demnach, dass die Entladung, wenn die Platte positiv ist, von ihrer Oberfläche anfängt und sich dazu die schwächste Stelle aussucht, während sie, wenn die Platte negativ ist, von der Spitze ausgeht. Diese Ansicht wird bestätigt durch einen Versuch von Lehmann [1]), bei dem ein starker auf die Anode gerichteter Luftstrom den Funken unterbricht, während er an anderen Stellen seiner Bahn keine Wirkung auf ihn ausübt. Es ist sogar auf Grund noch unveröffentlichter Versuche zweifelhaft, ob eine plötzliche Funkenentladung jemals von der Kathode ausgeht. Hieraus scheint also zu folgen, dass wenn Funken überhaupt der Kettenbildung in Gasen bedürfen, die Ketten sich schneller von der Anode aus bilden, als an der Kathode. Dies würde der Fall sein, wenn die Kettenbildung aus irgend einem Grunde an der Oberfläche des Metalls

[1]) Wiedemann's Annalen, 44. 645. 1891.

in einer der positiven Elektrisirung entsprechenden Richtung schon angefangen hätte. In der That hat Herr J. J. Thomson nachgewiesen, dass in einer sehr langen, luftleeren Röhre die positive Entladung fast die ganze Strecke zurücklegt und der negativen Entladung bis ganz in die Nähe ihrer Elektrode entgegenkommt.

Nun ist es sehr wohl möglich, dass die von Volta beobachtete Erscheinung auf dem Vorhandensein solcher rudimentärer Ketten beruht, die an der Oberfläche des Metalls haften, vermöge seiner chemischen Anziehung für das Gas oder Mittel, in dem es sich befindet.[1]) Mithin wären *vielleicht* die Potentialdifferenz bei Volta's Versuch und die Asymmetrie zwischen positiven und negativen Entladungen verschiedene Wirkungen derselben Ursache. Diese Anschauungsweise stimmt jedenfalls überein mit der Thatsache, dass die Entladung durch Gase von einer Spitze aus leichter vor sich geht wenn die Spitze negativ ist. Dieselbe Ursache, die bei der Anode die Bildung molekularer Ketten befördert, hindert sie bei der Kathode, weil die Molekeln der dünnen Luftschicht bei Volta's Versuch in verkehrter Richtung zum Felde angeordnet sind und sich erst durch eine Drehung von 180° neu ordnen müssen, ehe die Ketten sich mit der Metalloberfläche verbinden können.

[1]) Nature vol. 43, p. 367.

Nun sind die Atome der Luftschicht enger mit einander verbunden als mit der Elektrode; es ist daher anzunehmen, dass unter der Einwirkung eines gleichmässigen Kraftfeldes die Neuordnung bei der Kathode anfangen wird, ehe die Ketten bei der Anode zerreissen. Diese Neuordnung wird die Molekeln der Luftschicht erschüttern und aller Wahrscheinlichkeit nach eine reichliche Menge von Atomen dissociiren oder loslösen, die dann ihre übertragende Wanderung antreten und die negative Entladung bilden werden.

Diese Atome werden, da sie unmittelbar von der Oberfläche der Kathode ausgehen, zunächst eine senkrechte Richtung zu derselben einschlagen, weil sie der Richtung der dort befindlichen Kraftlinien folgen müssen. Wenn das Gas unter hohem Druck steht, so werden sie bald durch wiederholte Zusammenstösse einen grossen Theil ihrer Anfangsgeschwindigkeit einbüssen und demnach empfindlich werden für die Einwirkung des viel schwächeren Feldes in einiger Entfernung von der Elektrode, sodass sie sich seiner Richtung mehr oder weniger vollständig anschliessen werden.

Ist dagegen der Druck sehr gering, so werden weniger Zusammenstösse erfolgen, die Atome werden daher voraussichtlich einen grossen Theil ihrer Anfangsgeschwindigkeit bewahren und ihre ursprüngliche Bahn beibehalten, unbekümmert um die Einwirkung des schwachen Feldes. Vielleicht lässt sich mit diesem Vorgang Crookes' bekannte „strahlende Materie" er-

klären, die bei ausserordentlich schwachem Druck sichtbar wird.

Im Ganzen ist jedoch die Entladung in Gasen ein Gegenstand, über den die Ansichten noch sehr schwanken und Vermuthungen wie die obige können nur versuchsweise vorgebracht werden.

65c. Es ist möglich, sich von der Grösse der von jedem einzelnen Gasatom beförderten elektrischen Ladung eine annähernde Vorstellung zu bilden. Herrn Schuster ist dies gelungen.[1]) Er lässt einen Magneten auf die geladenen Theilchen einwirken, während sie die Kathode in einem mässig hohen Vacuum verlassen, und beobachtet die durch diesen hervorgerufene Ablenkung ihrer Bahn vermöge ihrer Leuchtkraft. Von gewissen Annahmen ausgehend berechnet er das Verhältniss der beförderten Elektricitätsmenge zu der Masse ihrer Träger, ausgedrückt durch den Krümmungsradius der leuchtenden Bahn, die Stärke des Magneten und das Potentialgefälle an der Kathode. Die resultierende Zahl ist von derselben Grössenordnung wie das durch elektrolytische Messungen gewonnene elektrochemische Aequivalent des Gases. Eine andere Methode besteht darin, die Stärke des Feldes an einer Stelle zu messen, wo die Ketten nur aus einer einzigen Molekel bestehen. Dies würde der Fall sein bei Platten, die durch eine molekulare Schicht getrennt sind, oder bei Spitzen von molekularen Dimensionen. Wenn man von wirk-

[1]) Bakerian Lecture, Proc. Roy. Soc. 47, p. 546.

lichen Beobachtungen [1]) ausgehend auf die Stärke des Kraftfeldes unter diesen unerreichbaren Bedingungen einen Schluss zieht, so ergiebt sich, dass die entsprechende Atomladung jedesmal von derselben Grössenordnung ist, wie die Ladungen, welche die Atome bei der Elektrolyse befördern. Möglicherweise wird sich daher später herausstellen, dass sie identisch sind; jedenfalls trägt dieser Umstand nicht wenig dazu bei, die oben entwickelte Ansicht zu unterstützen, dass die Ursache der Asymmetrie zwischen positiven und negativen Entladungen elektrolytischer Art ist. Chemische Veränderungen in den Dämpfen von Elektrolyten, die einer hinreichend starken elektrostatischen Spannung [2]) unterworfen werden (wie z. B. die Zersetzung von Wasserdampf in Sauerstoff und Wasserstoff) deuten in derselben Richtung.

65 d. Eine wichtige Folge des Zerreissens der molekularen Ketten, die zugleich eine nothwendige Bedingung der Leitung in Gasen zu sein scheint, ist der Umstand, dass an jedem Ende der Kette ein Atom dissociirt wird. Ja, man kann sagen, dass die Ketten hauptsächlich dazu dienen, dem Potentialgefälle die Herbeiführung der Dissociation zu ermöglichen. Die Molekeln in der Umgebung einer Elektrode brauchen nur zersprengt zu werden, damit Leitung erfolgt. So gerathen z. B. nach Herrn Schuster Gase in einen „empfindlichen Zu-

[1]) A. P. C., Phil. Mag. September 1891.

[2]) Lehmann, Molekular-Physik, vol. 2 p. 328.

stand", sobald eine Entladung innerhalb ihrer Grenzen stattfindet; in diesem Zustand vermag jede, auch die geringste elektromotorische Kraft Elektricität durch die Gase zu befördern. Das Gas verliert für den Augenblick vollständig die Fähigkeit der Isolation für schwache elektrostatische Spannungen. Offenbar sind es die in einem Theil des Gases durch die Entladung dissociirten Atome, welche die Leitung auch in den übrigen Theilen erleichtern.

Da Wärme zur Dissociation von Gasen beiträgt, so tritt dieser empfindliche Zustand auch ein, wenn man die Temperatur eines Gases hinreichend erhöht.

Aus diesem Grunde sind wahrscheinlich Flammen so ausgezeichnete Leiter. Einige Versuche von Herrn Worthington über die Entladung von Elektricität durch Flammen[1]) sind in diesem Zusammenhange lehrreich. Sie deuten darauf hin, dass eine anscheinend neutrale Flamme eine Anzahl entgegengesetzt geladener Atome enthält, die durch elektrostatische Spannung von einander getrennt werden können. Auch Herr J. J. Thomson hat die Leitung heisser Gase und Dämpfe erforscht und ist zu dem bedeutsamen Schluss gelangt, dass nicht die Dissociation überhaupt, sondern vielmehr eine besondere Art der Dissociation den Gasen Leitungsvermögen verleiht. Nach seiner Ansicht müssen die Molekeln in *Ionen* zersprengt werden. Bei Wasser-

[1]) Brit. Ass. Electrolysis Committee's Report, 1889; Newcastle volume, p. 225.

dampf z. B., der in Wasserstoff- und Sauerstoff*molekeln* zersetzt wird, bringt die Dissociation keine Steigerung des Leitungsvermögens hervor.[2]) Auch hierin sehen wir also einen Beweis, dass sich die Leitung in Gasen auf elektrolytischem Wege vollzieht.

Der Strom als fortbewegte Ladung

66. Halten wir nun Umschau auf dem Gebiet, das wir uns zu eigen gemacht haben. Wir suchten uns zunächst eine Vorstellung zu bilden von dem Wesen einer elektrostatischen Ladung und den Funktionen eines dielektrischen Mittels in der Elektrostatik. Alsdann suchten wir, so weit es anging, die Erscheinungen der strömenden Elektricität auf Elektrostatik zurückzuführen. Denn, da ein Strom nur Elektricität in Bewegung ist, so braucht er nichts weiter zu sein als ein geladener Körper, der rasch fortbewegt wird.

Man lade eine Kugel mit positiver oder negativer Elektricität und schleudere sie in irgend einer beliebigen Richtung, so bildet sie einen positiven oder negativen Strom in dieser Richtung. Einer weiteren Erklärung des Stromes bedarf es nicht. Ein dauernder Strom zwischen zwei Körpern kann erhalten werden, indem man eine Anzahl Markkügelchen oder Staubtheilchen von einem zum anderen schwingen lässt. Diese würden

[2]) J. J. Thomson, Phil. Mag. April 1890.

die positive Elektricität in der einen Richtung, die negative Elektricität in der anderen Richtung befördern. Allerdings würden solche Träger, die mit ihren entgegengesetzten Ladungen an einander vorbei wandern, sehr geneigt sein, an einander hängen zu bleiben und sich zu verbinden. Sie müssten dann auf elektrischem Wege wieder zersprengt oder durch den Anprall anderer Theilchen auseinandergerissen werden; geschähe dies nicht, so würde der Strom bald in's Stocken gerathen und man würde nichts haben als ein polarisirtes Mittel.

Man denke sich statt der Markkügelchen geladene Atome und man erhält ein rohes Bild von dem, was einerseits in einem Elektrolyten, andererseits in einem Dielektricum vorgeht. Unklarer ist das Verhalten von Metallen und festen Leitern. Bei diesen kann von einer Beförderung durch Träger nicht die Rede sein; da aber keine andere Erscheinung hinzutritt, liegt es nahe, sich den Vorgang als nicht ganz unähnlich vorzustellen; hierzu wurde § 27 ein Versuch gemacht, jedoch mit geringem Erfolg.

67. Der elektrische Strom braucht, wie gesagt, nichts Complicirteres zu sein, als eine geladene Kugel in rascher Bewegung; und durch eine genaue Betrachtung dieses Vorganges haben wir viele Eigenschaften des Stromes kennen gelernt. Indessen auch so ist das Problem keineswegs einfach. Es sind in Betracht zu ziehen nicht blos die bekannte in Bewegung begriffene Ladung, sondern auch die entgegengesetzte inducirte Ladung,

die durch Kraftlinien (oder Inductionsröhren, wie man auch sagt) mit jener verbunden ist. Dieses ganze verwickelte System bewegt sich und erzeugt dadurch in dem Mittel eine ganz neue Erscheinung, eine drehende Bewegung, die man nicht ohne Weiteres vorausgesetzt haben würde. Sie bewirkt, dass zwei gleichnamig geladene, in rascher Bewegung befindliche Kugeln sich weniger stark abstossen als im Ruhezustand und sogar bei hinreichend rascher Bewegung dahin gelangen können, sich anzuziehen; dass ferner eine Beziehung zwischen Elektricität und Magnetismus entsteht und der in Bewegung begriffene geladene Körper eine Magnetnadel ablenkt (§§ 113 und 184). Siehe das Weitere im III. Theil.

THEIL III

MAGNETISMUS

KAPITEL VII

BEZIEHUNGEN ZWISCHEN MAGNETISMUS UND ELEKTRICITÄT

68. Wir kommen nun zur *rotirenden* Elektricität. Was geschieht, wenn man die Elektricität in wirbelnde Bewegung versetzt? Man wickele einen stromdurchflossenen Draht zu einer Spule zusammen und prüfe. Man wird finden, dass die Spule sich verhält wie ein Magnet. Magnetnadeln, die man in ihre Nähe bringt, werden abgelenkt, Stahl wird magnetisirt, und eiserne Nägel oder Eisenfeilspäne werden angezogen, ja, wenn der Strom stark genug ist, in sie hineingesogen. Kurz, *sie wird zum Magneten;* natürlich nicht dauernd, sondern nur so lange der Strom anhält. Die Annahme liegt nahe, dass Magnetismus möglicherweise einfach rotirende Elektritricität sein könnte. Verfolgen wir diesen Gedanken weiter.

Vor allen Dingen ist zu bemerken, dass eine Drahtspule, durch die ein Strom geleitet wird, sämmtliche

Eigenschaften eines wirklichen Magneten besitzt. (Die umgekehrte Behauptung würde nicht ganz zutreffen.) Lässt man eine mit einer Batterie verbundene Drahtspule auf dem Wasser schwimmen, so erhält man eine Magnetnadel; ihre Achse stellt sich ganz von selbst in der Richtung von Norden nach Süden ein. Wenn man zwei Drahtspulen frei aufhängt, so tritt Anziehung, Abstossung oder Drehung ein, genau wie bei zwei Magneten.

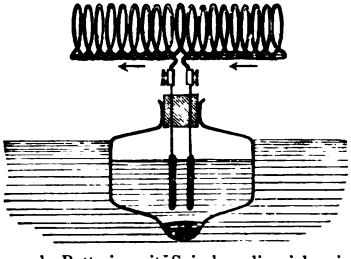


Fig. 16. — Schwimmende Batterie mit Spirale, die sich wie eine Magnetnadel verhält.

69. Solange es sich um die Wirkung der Drahtspule auf entfernte Gegenstände handelt, ist die Gestalt des Magneten, den sie ersetzt, unwesentlich; sobald man sich aber mit ihrer Wirkung auf Dinge in ihrer unmittelbaren Nähe beschäftigt, muss die Gestalt der entsprechenden Magneten näher angegeben werden.

Ist die Drahtspule eine lange, cylindrische Spirale, wie ein enggewundener Korkzieher (Fig. 16), so verhält sie sich wie ein cylindrischer Magnet von gleichem

Umfang. Bildet sie dagegen einen kurzen, breiten Ring, so verhält sie sich wie ein cylindrischer Magnet, der unendlich kurz, mit einem Wort eine Scheibe ist. Eine Stahlscheibe, die so magnetisirt ist, dass die eine Oberfläche ein Nordpol, die andere ein Südpol ist, kann man jedem dünnen stromdurchflossenen Drahtring entsprechend gestalten. Je nach der Form des Ringes wird sie rund, viereckig oder unsymmetrisch sein.

Der Ring braucht nicht aus mehreren Windungen zu bestehen; die Zahl der Windungen erhöht nur seine Leistungsfähigkeit; eine einzige genügt, auch darf sie von jeder beliebigen Form und Grösse sein. Da, wie erinnerlich, jeder Strom in einem geschlossenen Kreise fliesst, so ist also *jeder Strom eigentlich eine Spule von mehr oder weniger willkürlicher Gestalt*, entspricht mithin irgend einem Magneten, dessen Form bestimmbar ist. Hieraus geht hervor, dass jeder elektrische Strom magnetische Eigenschaften besitzen muss; beide Erscheinungen sind unzertrennlich — eine Thatsache von grosser Wichtigkeit. Siehe Anhang (a).

In einem Punkt unterscheidet sich die Drahtspule, und zwar zu ihren Gunsten, von der magnetisirten Scheibe; sie besitzt nämlich eine Eigenschaft, die dem gewöhnlichen Magneten abgeht; ihr Inneres ist zugänglich. Die Wirkungen auf den äusseren Raum sind die gleichen; die Wirkungen auf den Innenraum sind aber verschieden. Die Drahtspule besitzt sämmtliche Eigenschaften des Magneten, der Magnet aber vermag

die Drahtspule nicht in jeder Beziehung zu ersetzen; das Perpetuum mobile würde sonst eine Alltagserscheinung sein.

70. Ich möchte nun recht anschaulich und eindringlich auf die Thatsache hinweisen, dass der Magnetismus in gewisser Weise mit Rotationserscheinungen verknüpft ist. Es liegt etwas in seinem Wesen, das, wenn man zweckmässig verfährt, leicht und naturgemäss zu einer drehenden Bewegung führt. Dies lässt sich an zwei Magneten nicht nachweisen, vielmehr muss man dazu einen Strom und einen Magneten haben und ihr gegenseitiges Verhalten beobachten.

Ein Magnet enthält bekanntlich zwei Pole — einen Nordpol und einen Südpol —, die entgegengesetzte Eigenschaften besitzen. Für viele Zwecke kann man ihn sich einfach als aus diesen beiden Polen bestehend denken und die Wirkung, die ein Strom auf einen Magneten ausübt, kann gedacht werden als zusammengesetzt aus seiner Wirkung auf jeden dieser Pole. Wie wirkt nun ein Strom auf einen magnetischen Pol? Zwei Ströme ziehen einander an oder stossen einander ab; zwei Pole desgleichen; aber ein Pol und ein Strom thun weder das eine noch das andere; sie üben eine drehende Kraft auf einander aus. Sie streben weder danach sich zu nähern, noch sich zu entfernen, sondern sie streben danach sich um einander zu drehen. Diese Wirkung ist seltsam und scheint auf den ersten Blick einzig in ihrer Art zu sein. Alle gewöhnlichen Wir-

kungen und Gegenwirkungen zwischen zwei Körpern vollziehen sich in der geraden Linie, welche beide verbindet; die Kraft zwischen einem Strom und einem Pol wirkt im rechten Winkel zu dieser Linie.

Helmholtz hat schon vor längerer Zeit (1847) nachgewiesen, dass das Princip von der Erhaltung der Kraft nur dann richtig sein kann, wenn die Kräfte zwischen zwei Körpern irgend eine Funktion der Entfernung zwischen den Körpern sind und in ihrer Verbindungslinie wirken. Hier haben wir nun einen Fall, wo die Kraft nicht in der Verbindungslinie wirkt; mithin erscheint die Erhaltung der Kraft widerlegt; die beiden Gegenstände können sich ewig um einander drehen. Dieser Umstand eröffnete den Verfechtern des Perpetuum mobile ein fruchtbares Feld; und wenn der Strom ohne fortgesetzte Arbeitsleistung erhalten werden könnte, so würde in der That das Perpetuum mobile verwirklicht sein. Allein hierin liegt schliesslich nichts Ungewöhnliches, denn dasselbe gilt von der Nähmaschine oder irgend einem anderen Mechanismus; wenn er ohne fortgesetzte Arbeitsleistung im Gange bliebe, so würde er ein Perpetuum mobile sein. Beschränkt man seine Aufmerksamkeit auf den Pol und den Strom, so wird die Kraft allerdings *nicht* erhalten, sondern vielmehr dauernd verschwendet; schliesst man aber die Batterie als einen wesentlichen Bestandtheil des ganzen Systems mit ein, so verschwindet alles Räthselhafte und der Vorgang erscheint vollkommen gesetzmässig.

71. Am einfachsten zeigt man vielleicht die Rotation eines Leiters, der einen elektrischen Strom um einen magnetischen Pol befördert, auf folgende Weise. Man hängt einen ungefähr 2 m langen Goldfaden, wie er

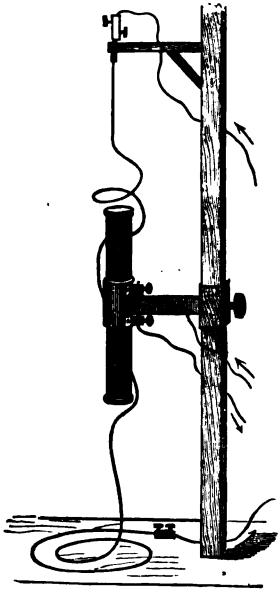


Fig. 17. — Langer, biegsamer Leiter, der sich als Spirale um einen kräftigen in seiner Nähe angebrachten Stabmagneten schlingt.

zum Besticken von Uniformen verwendet wird, senkrecht auf und sendet einen möglichst starken Strom hindurch. Alsdann nähert man einen Stabmagneten in verticaler Richtung. Sofort dreht sich der Faden in

eine Spirale, deren eine Hälfte sich um das nördliche Ende des Magneten schlingt, während die andere Hälfte als ein Theil derselben Spirale das südliche Ende umwindet. (Fig. 17.)

Wäre umgekehrt der Magnet biegsam und der

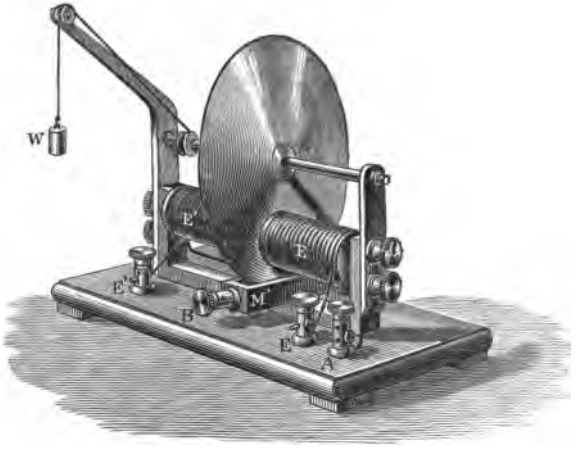


Fig. 18. — Drehbare Scheibe mit radialem Strom, die in einem magnetischen Felde rotirt und ein Gewicht hochwindet. Der Strom wird der Achse durch die Schraube *A* zugeführt und verlässt den Rand durch den Quecksilbertrog *M*. Derselbe Apparat eignet sich auch, um den durch Bewegung inducirten Strom zu zeigen, die direkte sowohl, wie die abschwächende Wirkung.

Leiter starr, so würde sich der Magnet in derselben Weise als Spirale um den Strom schlingen; die Erscheinung ist umkehrbar. Ein starrer Magnet, den man in die Nähe eines starren Leiters bringt, zeigt nur die letzten Spuren dieser Wirkung; er stellt sich im rechten

Winkel zu dem Draht ein und nähert sich seiner Mitte, um ihn zu berühren; mehr kann er nicht thun.

Der Versuch mit dem biegsamen Goldfaden ist einfach, überzeugend und wirkungsvoll. Aber die dem Magnetismus eigenthümlichen drehenden Eigenschaften können noch auf zahllose andere Arten anschaulich gemacht werden. Man mache z. B. eine Scheibe um ihren Mittelpunkt drehbar und stelle rings um den Rand oder auch nur an einem Punkt desselben einen

Fig. 19. — Anderes Modell einer drehbaren Scheibe mit Spurkranz, der in Flüssigkeit eintaucht und rings um den Rand den Contact herstellt. Sie rotirt bei der Annäherung eines Magneten von oben oder unten; oder sogar im Erdfeld.

leichten Contact her. Alsdann leite man einen Strom von der Mitte aus nach dem Rande der Scheibe und nähere der Contactstelle parallel zur Drehungsachse einen Stabmagneten, oder besser noch zwei Stabmagneten mit entgegengesetzten Polen, auf beiden Seiten der Scheibe. Die Scheibe wird sofort anfangen sich zu drehen. (Fig. 18 u. 19.)

Statt der Scheibe kann man auch einen einzelnen Radius derselben nehmen, d. h. einen drehbaren Arm

(Fig. 20), der in einen kreisförmigen Quecksilbertrog eintaucht; oder man nehme eine leichte Kugel, die auf zwei concentrischen Schienen läuft (Anordnung von Gore, Fig. 21).[1]) Die Rotation beginnt jedesmal, sobald man den Magneten nähert.

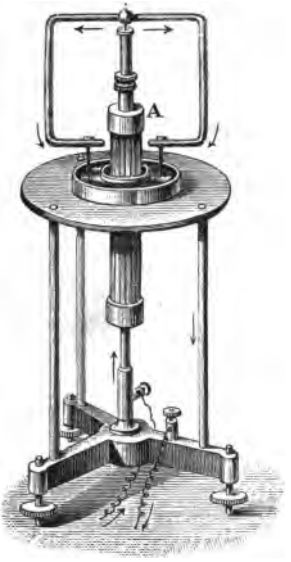


Fig. 20. — Zwei Radien der obigen Scheibe, mit Stiften versehen, die in das Quecksilber eintauchen. Die Scheibe rotirt beständig unter der Einwirkung des Stahlmagneten *A*, oder eines Stroms, der durch eine um den kreisförmigen Trog gewundene Drahtspule fliesst.

[1]) Dies ist nicht die gewöhnliche Anwendung der Gore'schen Eisenbahn; auch ist die Ursache der Bewegung nicht dieselbe, die der Erfinder beobachtete und die in Tyndall's *Wärme* beschrieben ist. Gewöhnlich bewegt sich die Kugel infolge von Störungen, die durch Wärmeentwicklung an der Berührungsstelle zwischen Kugel und

72. Auch beschränkt sich die drehende Wirkung nicht blos auf Leiter und wirkliche Leitung. Flüssigkeiten und Gase sind ihr in genau derselben Weise unterworfen, obgleich diese die Elektricität eher übertragen als leiten.

Um das Rotiren flüssiger Leiter unter der Einwirkung eines Magneten zu zeigen, nehme man einen

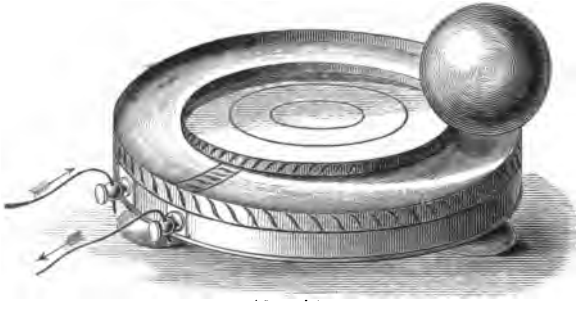


Fig. 21. — Kreisförmige Eisenbahn von Gore. Die leichte Metallkugel kreist auf zwei concentrischen Metallschienen, wenn sie in verticalem, magnetischem Felde einen Strom von der einen zur anderen leitet.

runden, flachen Trog mit Flüssigkeit, versehe ihn in der Mitte und am Rande mit starken Elektroden aus

Schienen entstehen; es ist dann ein reiner Zufall, in welcher Richtung sie rollt. Wenn aber das magnetische Feld der Erde stark genug wäre, so müsste sie eine bestimmte Richtung allen anderen vorziehen; und verstärkt man das Feld, indem man den Südpol eines Stabmagneten unter den Apparat bringt, so tritt echte magnetische Rotation ein. Es sei jedoch bemerkt, dass die eigenen Kraftlinien des Stroms in diesem Fall nicht im Stande sind, eine anhaltende Bewegung zu erzeugen. Ein äusseres Feld ist nothwendig.

Kupferblech und bringe den Pol eines Magneten unter den Apparat. Die Flüssigkeit geräth sofort in's Drehen und kann, wenn Strom und Magnet stark genug sind, in eine so heftige Wirbelbewegung versetzt werden, dass sie über den Rand des Troges wegspritzt (Fig. 22).[1]) Der Versuch ist derselbe wie auf Fig. 19, mit dem Unterschiede, dass die Scheibe nicht fest, sondern flüssig

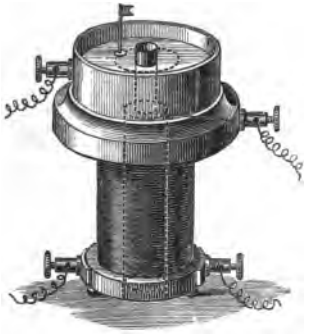


Fig. 22. — Rotiren einer Flüssigkeitsscheibe, die in verticalem magnetischem Felde einen radialen Strom leitet.

ist. Oder man kann ihn auch als gleichbedeutend mit Fig. 21 betrachten. Kehrt man den Strom um,

[1]) Bei der Ausführung dieses Versuchs theilt man am Besten den Strom zwischen dem Magneten und der Flüssigkeit, d. h. man schaltet sie besser parallel, als hintereinander. Auch empfiehlt es sich, die kleinere Elektrode zur Kathode zu machen, weil sich bei intensiven Strömen (z. B. 3 Ampère auf den qcm) auf der Anode eine Kruste von Oxyd bildet, deren Widerstand den Strom beinahe gänzlich unterbricht.

so findet die Drehung sofort in der umgekehrten Richtung statt.

Ein anderer Versuch ist der, einen Strom in der

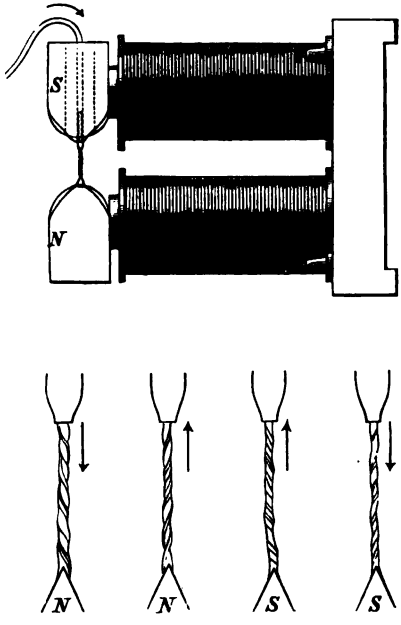


Fig. 23. — Flüssigkeitsstrahl, der einen Strom zwischen zwei magnetischen Polen leitet und dadurch in eine Spirale gedreht wird. (Die Abbildung ist einem Artikel von Herrn Silvanus Thomson im Phil. Mag. entlehnt.)

Nähe eines Magneten an einem Quecksilberstrahl entlang zu leiten. Der Strahl dreht sich sofort in eine flache Spirale wie auf Fig. 23.

Das Rotiren einer Entladung in Gas wird gewöhnlich durch folgenden Versuch veranschaulicht (Fig. 24). Man führt die Enden einer Induktionsspule in das verdünnte Gas ein und zwar oberhalb des einen Pols eines Magnetstabes und um seine Mitte. Wenn es gelingt, die

Fig. 24. — Entladung einer Induktionsspule von *a* nach *b* durch verdünntes Gas und deren Rotation um einen mit Glas geschützten magnetisirten Eisenstab.

Entladung hauptsächlich auf eine Seite zu concentriren, was nicht immer ganz leicht ist (es scheint vom Vorhandensein von Spuren eines fremden Dampfs, z. B. des CS_2 Dampfs im Vacuum abzuhängen), so sieht man, wie die leuchtende Bahn sich dreht.

Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einer fortbewegten elektrischen Ladung

73. Erinnert man sich dieser Thatsachen, sowie des Umstandes, dass eine fortbewegte Ladung ein Strom ist, so unterliegt es keinem Zweifel, dass ein geladenes Markkügelchen, das sich in der Nähe eines Magneten bewegt, dieselbe drehende Bewegung erleidet. Auf einen *ruhenden,* geladenen Körper übt der Magnet keine bekannte Wirkung aus. Sobald aber einer der beiden Körper sich bewegt, entsteht eine Kraft, die danach strebt, sie um einander zu drehen. Allerdings ist diese Kraft für gewöhnliche Geschwindigkeiten ausserordentlich klein; es ist jedoch ganz unzweifelhaft, dass, wenn man eine Anzahl geladener Markkügelchen oder Bärlappsamen auf einen Magnetpol streut, sie nicht in einer geraden Linie fallen, sondern in schwach spiralförmigen Windungen.

Ebenso würden die Bahnen einer Anzahl geladener Theilchen, die von der Spitze eines Magneten horizontal oder radial ausgesandt würden, sich drehen wie die Strahlen eines Blickfeuers. Und wenn man sie auf irgend eine Art gerade erhielte oder in der entgegengesetzten Richtung ablenkte, so würden die Theilchen auf den Magneten ein unendlich kleines Drehungsmoment ausüben, unter dessen Einwirkung er danach streben würde, sich um seine eigene Achse zu drehen.

Würde umgekehrt ein Magnet mechanisch rasch um seine Achse gedreht, so ist anzunehmen, dass er auf geladene, in seiner Nähe befindliche Körper eine Wirkung ausüben müsste, die sie veranlasst, sich in radialer Richtung entweder zu nähern oder zu entfernen. Dies könnte am besten geschehen, indem man eine Art Elektrometernadel, die an einem Ende positiv, am anderen negativ elektrisirt wäre, in der Nähe des rotirenden Magneten aufhängte und nach den Spuren einer Ablenkung suchte, die bei umgekehrter Rotation im umgekehrten Sinne erfolgen müsste. Ein Magnet von veränderlicher Stärke wäre vielleicht noch zweckmässiger als ein rotirender Magnet.[1]) (Siehe §§ 114—116.)

Rotiren eines Magneten unter der Einwirkung eines Stroms

74. Am einfachsten lässt sich das wirkliche Rotiren eines Magneten nachweisen, indem man einen Strom bis zur Mitte hindurchleitet und dann ausserhalb wieder zurückführt. Man nehme einen kleinen, runden, polirten, stählernen Stabmagneten mit spitzen Enden, spanne ihn in senkrechter Richtung drehbar ein und versehe ihn an einem der Pole, sowie in der Mitte mit je einem Con-

[1]) Ueber Versuche, welche diese Wirkung nachweisen sollen und in der That eine sehr geringe Spur davon zeigen, siehe Phil. Mag. Juni 1889, p. 469.

tactstück aus Staniol. Vermittelst dieser Contactstücke theile man dem Magneten einen Strom mit und er wird sich mit grosser Geschwindigkeit drehen. Kehrt man den Strom um, so rotirt der Magnet in umgekehrter Richtung. Wenn man andererseits den Magneten

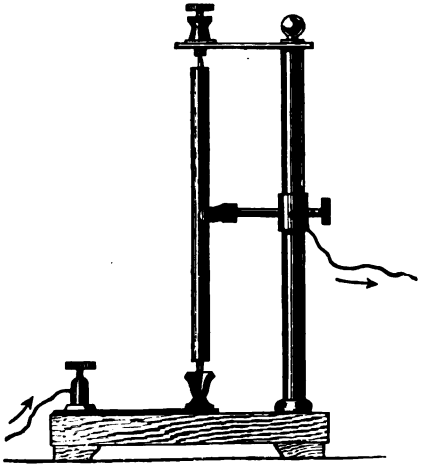


Fig. 25. — Cylindrischer, blanker Stahlmagnet, an oeiden Enden drehbar eingespannt. Der Magnet dreht sich rasch um seine Achse unter der Einwirkung eines Stroms, der ihm vom oberen oder unteren Ende zugeführt und nahe der Mitte vermittelst eines Contactstückes aus Staniol wieder entzogen wird.

mechanisch rotiren lässt, so entsteht ein Strom in dem Draht, der die beiden Contactstücke verbindet. (Fig. 25, 26 und 27.)

Die Contactstücke können überall an dem Magneten angebracht werden, ausgenommen in symmetrischer An-

ordnung. Wenn sie gleich weit von der Mitte entfernt sind, bleibt die Wirkung aus. Diese ist um so stärker, je näher das eine Contactstück der Mitte und das andere

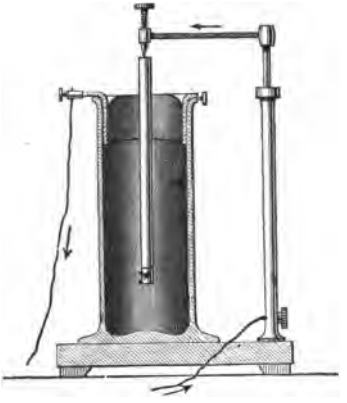


Fig. 26. — Andere Anordnung desselben Versuchs. Der Magnet schwimmt in Quecksilber.

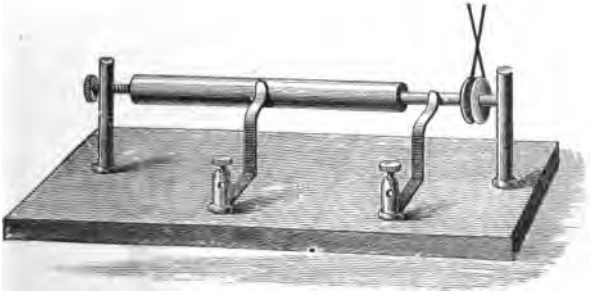


Fig. 27. — Umkehrung des auf Fig. 25 abgebildeten Versuchs. Der Magnet rotirt mechanisch und erzeugt dadurch einen Strom zwischen zwei Federn, von denen die eine ihn nahe der Mitte, die andere am einen Ende berührt.

dem Ende ist; am stärksten ist sie, wenn sich der eine Contact am äussersten Ende oder darüber hinaus befindet, wie bei Fig. 25.

75. Die hergebrachte, zuerst von Faraday angewandte Versuchsanordnung, bei der ein von dem Magneten getragener Draht in einen kreisförmigen, den Magneten umschliessenden Quecksilbertrog eintaucht, ist weniger einfach und anschaulich als das auf Fig. 25 dargestellte Verfahren; auch ist sie weniger wirkungsvoll, es sei denn, das der cylindrische Trog den Magneten sehr eng umschliesst. Die Anordnung auf Fig. 25, bei der der Contact auf der Oberfläche des Magneten selbst hergestellt wird, ist theoretisch die wirksamste.

Es giebt noch zahlreiche andere Methoden diesen Versuch auszuführen; die oben genannten sind jedoch typisch und genügen. Sie weisen sämmtlich darauf hin, dass der Magnetismus, elektrisch betrachtet, eine Rotationserscheinung ist.

KAPITEL VIII

WESEN DES MAGNETISMUS

Ampère'sche Theorie

76. Der Gedanke, den Magnetismus auf eine Wirbelbewegung der Elektricität zurückzuführen, ist keineswegs neu; er schreibt sich schon von Ampère her. Von der Beobachtung ausgehend, dass ein Magnet durch einen elektrischen Wirbel ersetzt werden kann, gelangte er zu der Hypothese, dass jeder Magnet einen elektrischen Wirbel enthalte, der Ursache seiner Eigenschaften sei. Selbstverständlich dachte er sich nicht, dass der Stahlmagnet von einem elektrischen Strom umkreist werde, wie der Elektromagnet. Nichts steht fester als der Umstand, dass ein Magnet nicht im Ganzen, sondern in seinen einzelnen Theilchen magnetisirt ist und dass er eigentlich nur aus einer Ansammlung polarisirter Theilchen besteht. Als Beweis hierfür dient der altbekannte Versuch einen Magneten in Stücke zu zerbrechen.

Vielmehr muss jedes Theilchen oder jede Molekel des Stabes einen eigenen elektrischen Kreisstrom besitzen; alsdann sind die Eigenschaften des Ganzen erklärt.

Nur eine Kleinigkeit bleibt gegen die Ampère'sche Theorie einzuwenden. Wodurch werden diese Molekularströme erhalten? Eine ähnliche Schwierigkeit bereitete vor langer Zeit in der Astronomie die Frage, wie man sich die fortgesetzte Bewegung der Planeten zu erklären habe? Man erfand beseelte Wesen, Wirbel und andere Vorrichtungen, um diese Frage zu beantworten, bis Galilei's Theorie der Mechanik diese Schwierigkeit endgültig hinwegräumte. Jeder Körper bewegt sich weiter, bis er aufgehalten wird. Wenn kein Widerstand vorhanden ist, so ist die Bewegung continuirlich.

Freilich, der gewöhnliche Strom wird durch Widerstand aufgehalten. Erzeugt man auf beliebige Art einen Strom in einem Metallring und überlässt ihn sich selbst, so setzt er binnen etwa einer halben Sekunde seine Energie in Wärme um. Vorausgesetzt aber, dass das Metall unendlich gut leitet, so würde keine Energie verbraucht werden und der Strom würde permanent sein.

In einem Metallstab muss sich die Elektricität von Atom zu Atom bewegen und hat dabei einen Widerstand zu überwinden; wer weiss aber, ob nicht die Atome selbst vollkommen leitend sind? Besitzen sie doch verschiedene andere unendliche Eigenschaften; so sind sie z. B. unendlich elastisch. Man bewahre einen

in Watte gewickelten Behälter mit Gas hundert Jahre lang auf und sehe zu, ob das Gas sich inzwischen abgekühlt hat. Dieser Versuch müsste, wenn er praktisch ausführbar wäre, gemacht werden; inzwischen berechtigt uns jedoch die Erfahrung anzunehmen, dass beim Zusammenstoss der Atome kein Verlust an Bewegung stattfindet, bis das Gegentheil entscheidend nachgewiesen wird. Da nun Atome *zweifellos* unendlich elastisch sind, warum sollten sie nicht auch unendlich leitend sein? Warum sollte ein ausschliesslich innerhalb eines Atoms kreisender Strom seine Energie verbrauchen? Kein bekannter Grund spricht dafür, und viele Analogien dagegen.

Was ist der Ursprung dieser Ströme? Ebenso gut könnte man fragen: Was ist der Ursprung irgend einer ihrer Eigenschaften? Auf diese Fragen giebt es keine Antwort, wir müssen uns mit der Thatsache begnügen. Die Atome einer bestimmten Substanz, des Eisens z. B., oder des Zink besitzen nun einmal die specifische physikalische Eigenschaft, dass in ihnen ein elektrischer Wirbel von einer gewissen Stärke kreist.

Soviel ist sicher, dass das Magnetisieren die Ampèreschen Ströme nicht erst hervorruft. Wenn man ein Stück Stahl oder Eisen magnetisirt, so erregt man damit nicht in jeder Molekel einen Ampère'schen Strom, man magnetisirt keineswegs jede einzelne Molekel. Vielmehr sind die Molekeln bereits von Anfang an vollständig magnetisch; das Magnetisiren bewirkt nur,

dass sie sich sämmtlich nach ein und derselben Richtung einstellen, d. h. polarisiren. Diese Thatsache wurde vor langer Zeit von Beetz festgestellt; doch will ich an dieser Stelle nicht näher darauf eingehen, sondern verweise auf Maxwell (II. Band, Kap. VI).

Erweiterung der Ampère'schen Theorie durch Weber zur Erklärung des Diamagnetismus

77. Fassen wir nun das Vorhergehende kurz zusammen. Wir haben folgende Behauptungen aufgestellt:

(1) Ein Magnet besteht aus einer Ansammlung polarisirter Molekeln.

(2) Jede dieser Molekeln ist an sich ein permanenter Magnet, einerlei ob die Substanz sich in ihrem gewöhnlichen oder in magnetisirtem Zustande befindet, und das Magnetisiren besteht darin, sie sämmtlich mehr oder weniger übereinstimmend zu richten.

(3) Wenn die Molekeln alle in derselben Richtung eingestellt sind, ist die Substanz magnetisch vollständig gesättigt.

(4) Wenn jede Molekel eines bestimmten Stoffs einen elektrischen Strom von bestimmter Stärke enthält, der in einer unendlich leitenden Bahn kreist, so sind die magnetischen Eigenschaften des Stoffs vollständig erklärt.

Aber, zugegeben, dass die Behauptungen richtig sind, wie kommt es, dass wir die Molekularströme nicht durch

magnetische Induktion erzeugen können? Und wenn wir dies nicht können, sind wir wenigstens im Stande, ihre Stärke zu verändern?

78. Die Antwort auf diese Fragen ist in nachstehenden Sätzen enthalten, die ich der Bequemlichkeit halber gleich folgen lasse und erst weiter unten erklären und rechtfertigen will.

(5) Wenn ein mit diesen Molekularströmen ausgestatteter Stoff in ein magnetisches Feld eingeführt wird, so wird der Strom in denjenigen Molekeln, die sich in die Richtung der Kraftlinien umzulagern vermögen, abgeschwächt; werden sie aus dem Felde entfernt, so erhalten sie ihre ursprüngliche Stärke wieder.

(6) Wenn unter normalen Verhältnissen in den leitenden Bahnen *keine* oder nur sehr schwache Ströme kreisen, so werden diese durch Einführung des Stoffs in ein magnetisches Feld umgekehrt, d. h. es werden *entgegengesetzte* Ströme erzeugt, die so lange anhalten, wie der Körper im Felde bleibt, aber aufhören, wenn er daraus entfernt wird.

(7) Dasselbe geschieht, wie stark die Ströme auch sein mögen, wenn die Molekeln unbeweglich sind und sich nicht unter der Einwirkung des Feldes richten können.

(8) Die auf diese Art magnetisch inducirten Molekularströme genügen, um die Erscheinung des *Diamagnetismus* zu erklären.

79. Rufen wir uns zunächst die bekannten elementaren Thatsachen der Strominduktion in's Gedächtniss. In einem Stromkreis, einer Drahtspule z. B., die man plötzlich einer stromleitenden Spule oder einem Magneten nähert, wird ein vorübergehender Strom inducirt, dessen Richtung der des inducirenden Stroms entgegengesetzt ist, der mit anderen Worten eine vorübergehende Abstossung zwischen beiden verursacht. Verharrt der Stromkreis in dieser Lage, so geschieht weiter nichts; entfernt man ihn aber, so wird darin ein zweiter, vorübergehender Strom in der dem ersten entgegengesetzten Richtung inducirt. Oder, um kurz die Thatsachen ganz allgemein zu fassen: Befindet sich ein Leiter in einem magnetischen Feld und nimmt dieses aus irgend einem Grunde an Intensität zu, so entsteht in dem Leiter ein vorübergehender Strom, der danach strebt, ihn aus dem Felde zu verdrängen; sinkt dann das magnetische Feld wieder auf seinen ursprünglichen Werth herab, so strömt genau die gleiche Elektricitätsmenge in der umgekehrten Richtung. Ein Apparat, der diese Thatsachen veranschaulicht, ist in Fig. 28 dargestellt. Eine Kupferscheibe hängt an einem drehbaren Arm dem Pol eines unerregten Stab-Elektromagneten gegenüber. Erregt man den Magneten, so wird die Scheibe heftig abgestossen, sie wird dagegen wieder angezogen, sobald die Magnetisirung aufhört.

80. Warum sind nun alle diese Wirkungen vorübergehend? Was hält den inducirten Strom so schnell

wieder auf? Nichts anderes als der Verbrauch von Energie; die Reibung in einem unvollkommenen Leiter. Der Strom wird durch nichts erhalten, findet bei seinem Durchgang durch das Metall Widerstand und hört daher auf.

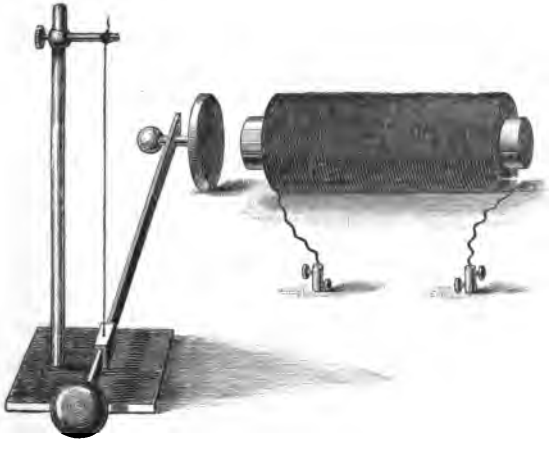


Fig. 28. — Eine starke Kupferscheibe an einem horizontal aufgehängten Arm ist dem einen Pol eines Stab-Elektromagneten genähert. Die Scheibe wird abgestossen, wenn der Magnet erregt wird, und angezogen, sobald die Magnetisirung aufhört.

In einem vollkommenen Leiter, wie z. B. einer Molekel, würde kein derartiger Verbrauch stattfinden. In einem derartigen Körper gehorcht die Elektricität dem ersten Gesetz der Bewegung und strömt weiter, bis sie durch die Einwirkung einer Gegenkraft aufgehalten wird. Nur die Vernichtung des magnetischen

Feldes kann einen inducirten Molekularstrom aufheben, sonst nichts. Hieraus folgt, dass die Abstossung, die eine Molekel erleidet, keine vorübergehende Wirkung ist, wie die auf Fig. 28, sondern eine ebenso permanente, wie das magnetische Feld, das sie erregt.

Demnach wird sich also ein Körper, dessen Molekeln vollkommen leiten, ohne dass jedoch ein specifischer Strom darin kreist, diamagnetisch verhalten, d. h. er wird von den starken Theilen des Feldes den schwachen zustreben, oder, wenn er sich nur drehen kann, sich wenigstens querstellen, wie Wismuth.

Diese Erklärung des Diamagnetismus ist, wo nicht die wahre, doch jedenfalls eine mögliche; ja, mir scheint sie höchst wahrscheinlich. Sie ist als die Theorie von Weber bekannt.

Es ist übrigens nicht unbedingt nothwendig, dass diamagnetische Stoffe gar keine specifischen Molekularströme besitzen; diese müssen nur schwächer sein, als die durch ein gewöhnliches magnetisches Feld inducirten. Wenn man sich also eines ausserordentlich schwachen Feldes bediente, so würden die specifischen Ströme nicht völlig neutralisirt werden und der Körper müsste sich verhalten wie eine sehr schwache magnetische Substanz. Man hat versucht eine solche Wirkung nachzuweisen.[1])

81. Aber es wäre auch allenfalls möglich, dass eine Substanz specifische Molekularströme besässe und doch

[1]) Siehe Nature, 33. Band S. 484.

nicht merkbar magnetisch wäre; jede einzelne Molekel könnte nämlich so festgeklemmt sein, dass sie nicht im Stande wäre, sich zu richten; ein derartiger Körper würde schwerlich wahrnehmbare magnetische Eigenschaften aufweisen. Die Molekeln würden sich in einem Zustand von kleinster potentieller Energie befinden und unfähig sein, irgend eine Wirkung auszuüben. Die inducirten Molekularströme würden sich den ursprünglichen Molekularströmen superponiren, als ob diese nicht vorhanden wären. Allerdings könnte man vielleicht durch Erwärmung oder Abkühlung die molekulare Anordnung einer solchen Substanz umändern und dadurch magnetische Eigenschaften in ihr wachrufen, ähnlich wie man durch Erwärmung oder Abkühlung elektrische Eigenschaften in Krystallen, wie z. B. im Turmalin wachruft.

Wir wissen nun mit Sicherheit soviel: die zur Erklärung des Magnetismus nothwendigen Molekularströme können unmöglich durch den Vorgang des Magnetisirens erregt werden, weil sie sich in der falschen Richtung bewegen. Da diejenigen Molekularströme, welche Abstossung verursachen, inducirt sind, müssen diejenigen Ströme, welche Anziehung verursachen, schon vorher dagewesen sein und nur durch die magnetisirende Kraft in neue Lagen gedreht werden. Ein intensives magnetisches Feld wird sie abschwächen und daher eine magnetische Substanz weniger magnetisch erscheinen lassen.

Funktion des Eisens im Magneten. Zwei Anschauungsweisen

82. Wir sind nun in der Lage zu erklären, wie Eisen oder andere magnetische Substanzen zur Verstärkung des magnetischen Feldes beitragen. Wenn man durch eine kreisförmig gebogene Drahtspule (Fig. 29) einen

Fig. 29.

Strom hindurchleitet, so entsteht zwischen den beiden einander gegenüberstehenden Endungen ein gewisses Feld, eine gewisse Anzahl von Kraftlinien. Füllt man die Drahtspule mit Eisen aus, sodass ein Elektromagnet entsteht, so wird die Intensität des Feldes wesentlich erhöht. Warum? Gewöhnlich erklärt man diese Erscheinung, indem man den magnetischen Kreis mit dem galvanischen Stromkreis vergleicht. So wie dort eine

elektromotorische Kraft, haben wir hier eine magnetomotorische Kraft und einen gewissen Widerstand oder eine „Reluctanz", wie Hr. Heaviside sagt. Der Quotient dieser beiden ergiebt die magnetische Induktion oder die Gesammtzahl der Kraftlinien. Eisen ist, nehmen wir an, 3000 mal durchlässiger als Luft; mithin ist der Widerstand des eisernen Theils des Kreises unwesentlich im Vergleich zu dem mit Luft erfüllten Zwischenraum zwischen den Polen. Man erhält also annähernd die Gesammtintensität des Feldes, wenn man die magnetomotorische Kraft durch die Länge dieses Zwischenraumes theilt, oder noch besser und vollständiger, wenn man die Verschiedenheiten des Materials und des Querschnitts eines magnetischen Kreises genau so berücksichtigt wie bei einem galvanischen Stromkreise und auf diese Weise den Gesammtwiderstand berechnet. Eisen ergiebt sich dann als ein 100 bis 10000 mal besserer magnetischer Leiter als Luft. Sein specifisches magnetisches Leitungsvermögen oder, wie die üblichere (von Thomson eingeführte) Bezeichnung lautet, seine Permeabilität wird bemessen nach dem Verhältniss der erzeugten Magnetisirung zu der angewandten magnetisirenden Kraft. Man setzt dafür gewöhnlich das Zeichen μ.[1])

83. Diese Anschauungsweise ist zweifellos einfach und bequem. Ihrer allgemeinen Aufnahme verdanken wir wesentliche Verbesserungen in der Construktion

[1]) Siehe Anhang (b).

von Elektromagneten und Dynamomaschinen und ihr praktischer Nutzen kann kaum überschätzt werden; nichtsdestoweniger darf man nicht vergessen, dass sie dem Ding nicht auf den Grund geht. Betrachten wir die Sachlage weniger mit Rücksicht auf ihre praktische Fasslichkeit, als um uns über den wirklichen Vorgang klar zu werden, so werden wir sie in folgender Weise darstellen:

Ehe das Eisen in die Spule eingeführt wurde, befanden sich innerhalb derselben eine gewisse Anzahl kreisförmiger Kraftlinien, die auf den Strom allein zurückzuführen waren. Ein gewöhnliches Stück Eisen besitzt, wiewohl es voll polarisirter Molekeln ist, keine nach Aussen wirkenden oder nutzbaren Kraftlinien; sie sind sämmtlich in kleinen geschlossenen Kreisen im Innern des Eisens gleichsam festgelegt. Sobald aber das Eisen in ein magnetisches Feld eingeführt wird, erschliessen sich einige dieser Linien, es bildet sich eine Kette polarisirter Molekeln und die Kraftlinien ihrer Molekularströme gesellen sich denjenigen zu, die dem Strom der magnetisirenden Spirale angehören.

Mithin besitzt nun unser Ring-Elektromagnet nicht blos seine eigenen ursprünglichen Kraftlinien, sondern noch einen grossen Theil der dem Eisen angehörigen, die sich jenen sympathisch angeschlossen haben.

Folgende Bemerkung sei hier eingeschaltet. Wenn das Eisen auf je eine anderweitig im Felde erzeugte Linie etwa 3000 eigene Linien (mehr oder weniger, je

nach seiner Beschaffenheit) mitbringt, so befindet es sich im Zustande höchster Permeabilität; es ist unendlich weit davon entfernt gesättigt zu sein. Nach einiger Zeit zeigt es jedoch Spuren der Sättigung und schliesslich giebt es gar keine eigenen Linien mehr her. Alsdann ist es als vollständig gesättigt zu betrachten und seine Permeabilität ist genau die der Luft. Die Permeabilität des Eisens ist eine ausserordentlich unbestimmte Quantität. Sie schwankt nicht allein bei demselben Stück, während es sich der Sättigung nähert, sondern sie ist auch überaus verschieden bei verschiedenen Sorten. So giebt es Manganstahl, dessen Permeabilität nur $1\,^1/_2$ mal grösser ist als die der Luft, oder ungefähr ebenso gross wie die des Zinks, während Ewing Eisen gefunden hat, dessen Permeabilität bis zu 20000 betrug, wenn es beim Magnetisiren erschüttert wurde.

Das Endergebniss beider Anschauungsweisen ist natürlich dasselbe: Die Zahl der Kraftlinien zwischen den Polen wird durch die Anwesenheit des Eisens vermehrt. Während jedoch bei der ersten Methode die Permeabilität nicht erklärt wird, bleibt bei der zweiten Methode nichts unerklärt, ausser gewissen grundlegenden Thatsachen, wie der, weshalb Ströme danach streben, sich mit ihren Achsen parallel zu einander einzustellen, und Aehnliches mehr.

Permanenter Magnetismus

84. Eine merkwürdige Wirkung, die nicht übersehen werden darf, wird durch die Einführung von Eisen oder anderen festen magnetischen Mitteln in ein magnetisches Feld hervorgebracht. Diese Wirkung hängt ab von der Festigkeit der Substanz, d. h. von der Unbeweglichkeit oder Starrheit ihrer Molekeln. In einem Fluidum können sich die Molekeln nach Belieben fortwährend neu anordnen; sein innerer Bau hat eine ebenso unbestimmte Form wie seine äussere Gestalt. Anders verhält es sich mit einem festen Körper. Haben die Molekeln in diesem einmal eine bestimmte Stellung angenommen, so streben sie mehr oder weniger danach, darin zu verharren; der Stoff kann elastisch sein, aber nach grösseren Störungen wird doch stets eine dauernde Veränderung in der Anordnung der Molekeln eintreten. Daher haben feste Körper eine bestimmte Gestalt, die nur mit Gewalt verändert werden kann; daher können sich auch ihre Molekeln zu geometrischen Formen krystallisiren.

Da nun der Vorgang des Magnetisirens darin besteht, eine Anzahl bereits polarisirter Molekeln übereinstimmend zu richten, so leuchtet ein, dass feste magnetische Substanzen sich anders verhalten werden als flüssige. Bei flüssigen Mitteln kann die magnetisirte Anordnung nur durch fortgesetzte Einwirkung der magnetisirenden

Kraft erhalten werden; sobald diese entfernt wird, verfallen die Molekeln wieder in den ursprünglichen regellosen Zustand kleinster Energie und verlieren jede Spur einer Magnetisirung. Sie lassen sich mit der grössten Leichtigkeit magnetisiren und entmagnetisiren sich eben so leicht wieder von selbst. Anders verhalten sich feste Körper. Werden die Molekeln nur durch eine schwache Kraft in ihrer magnetisirten Lage festgehalten, so schnellen sie fast vollständig wieder zurück, sobald die magnetisirende Kraft entfernt wird; wirkt aber eine einigermassen starke Kraft ein, so kehren sie nur theilweise zurück und eine dauernde Veränderung in der Anordnung der Molekeln tritt ein. Der erstere Vorgang entspricht temporärem, der zweite permanentem Magnetismus. Der Unterschied zwischen beiden lässt sich veranschaulichen, indem man ein Stück Papier und einen Streifen Blech zusammenbiegt und dann wieder loslässt.

In der Fähigkeit den Magnetismus zu behalten, zeigen die verschiedenen Stoffe ausserordentliche Unterschiede; Stahl besitzt diese Eigenschaft bekanntlich in hohem Grade, doch ist sie allen Stoffen mehr oder weniger eigen.[1]) Viele Stoffe behalten Spuren der magnetischen Anordnung, solange man sie in Ruhe lässt, verlieren sie aber bei Erschütterung, Erwärmung, manche sogar schon bei leiser Berührung. Ein langer dünner Stab aus weichem Eisen ist in dieser Beziehung

[1]) Siehe einen Brief in Nature, 33. Band S. 484.

ungemein lehrreich. Er lässt sich leicht mit Hülfe des Erdmagnetismus magnetisiren, indem man ihn vertical hält und mit dem Finger klopft. Kehrt man ihn nun langsam und vorsichtig um, so bewahrt er fast den ganzen inducirten Magnetismus; wenn man ihn aber wieder klopft oder (so empfindlich sind manche Stäbe) auch nur mit den Fingern daran entlang streicht, so genügt dies, um die ganze Erscheinung umzukehren. Weiches Eisen kann eigentlich bedeutend mehr Magnetismus behalten als Stahl, aber es verliert ihn leicht wieder. Sein Magnetismus ist nur als halb permanent zu bezeichnen.

85. Ein kurzer dicker Stab behält weniger Magnetismus als ein langer dünner; ein kurzer Stab aus dem weichsten Eisen behält ihn so gut wie garnicht. Besser eignet sich ein Stück Eisen, das, wie auf Fig. 29, ringförmig gebogen ist; noch vortheilhafter ist es, wenn die Lücke zwischen den Polen durch ein zweites Stück Eisen, einen sogenannten „Anker", ausgefüllt wird. Dagegen bewahrt ein aus einem Stück geschweisster Ring, bei dem die letzte Spur einer Luftschicht zwischen Anker und Magnet fehlt, den Magnetismus fast vollständig. Doch ist auch in diesem Falle eine gewisse entmagnetisirende Kraft vorhanden, da ein magnetisirter Flüssigkeitsring nicht magnetisch bleibt. Auch habe ich selbst festgestellt, dass das Klopfen und Erschüttern eines Eisenringes dessen Magnetisirung merklich schwächt; doch ist diese entmagnetisirende Kraft sehr

gering im Vergleich zu der eines Eisenringes mit einer Luftlücke.

Hieraus geht hervor, dass der speciell entmagnetisirende Theil eines magnetischen Kreises der flüssige, d. h. der aus Luft bestehende Theil ist; je grösser das Verhältniss dieses flüssigen Theils zum Ganzen, um so leichter vollzieht sich die Entmagnetisirung. Wenn man also in Luft oder Flüssigkeit, die einen festen Magneten umgiebt, Kraftlinien künstlich aufrecht erhält, so entfällt die ganze Spannung lediglich auf die Starrheit des festen Körpers. Denn da Flüssigkeiten ihren Magnetismus sofort wieder verlieren, so muss der feste Körper nicht nur seinen eignen Magnetismus, sondern auch den des übrigen Feldes bewahren, d. h. die Molekeln der Flüssigkeit ihrer Gegenkraft zum Trotz richten.

86. Sämmtliche über den Magnetismus bekannte Thatsachen haben seit Kurzem durch die Untersuchungen von Ewing neues Interesse erhalten. Der längst bekannte Umstand allerdings, dass feste Körper frühere molekulare Störungen in ihrem Bau aufbewahren, sodass die Spuren einer Wirkung noch erkennbar sind, nachdem die Ursache längst aufgehört hat zu bestehen, ist keineswegs auf den Magnetismus beschränkt; es ist dies eine allgemeine Eigenschaft aller festen Körper, die ihre theoretische Behandlung nicht wenig erschwert. Die Eigenschaften aller Fluida, der Flüssigkeiten sowohl wie der Gase, sind nur abhängig

von ihrem gegenwärtigen Zustande. Wie sie in diesen Zustand gelangten und was früher mit ihnen vorgegangen ist, kommt nicht in Betracht. Wasserstoff von 0° C. unter 76 cm Druck ist eine vollkommen definirte Substanz. Wasser von 50° C. unter 1 Atmosphäre Druck ist ebenfalls ein fester Begriff. Beinahe dasselbe gilt von einigen krystallinischen Körpern. Quarz oder Eis bei gegebener Temperatur und gegebenem Druck können als bestimmt definirte Zustände angesehen werden, wiewohl sie vielleicht nicht ganz so bestimmt sind, wie man gewöhnlich annimmt. Aber Glas oder Stahl oder Kupfer bei gegebener Temperatur sind keineswegs definirte Substanzen, sondern unterscheiden sich, je nachdem sie auf die bestimmte Temperatur abgekühlt oder erwärmt wurden. Wir müssen erst wissen, ob sie zuvor gehärtet, angelassen oder gekühlt worden sind, u. s. w. Die Eigenschaften eines festen Körpers beruhen ebensowohl auf seiner Vergangenheit, als auf seinem gegenwärtigen Zustand.

Dies Alles gilt im höchsten Grade auch von der Magnetisirung. Um das Verhalten eines Magneten von Grund aus zu verstehen, muss man nicht nur seinen gegenwärtigen Zustand kennen, sondern man muss auch wissen, wie er in diesen Zustand gelangt ist. Ein Stück Stahl, das schon einmal magnetisirt war und wieder magnetisirt wurde, unterliegt anderen Bedingungen, als wenn es sich nie in einem magnetischen Felde befunden hat; es sei denn, dass es umgeschmolzen worden ist.

Soviel muss allerdings zugegeben werden, dass, wenn *Alles* über den gegenwärtigen Zustand eines Körpers bekannt wäre, man nicht auf seine Vergangenheit zurückzugreifen brauchte; man würde sie vielleicht sogar zum Theil aus seinem gegenwärtigen Zustand schliessen können. Aber gerade deshalb, weil wir uns unmöglich über die Lage und Beziehungen jeder einzelnen Molekel unterrichten können und weil wir uns mit der Erkenntniss weniger, in die Augen fallender Thatsachen begnügen müssen, ist die Erforschung der Vergangenheit geboten. Für Flüssigkeiten genügt die Beobachtung weniger Thatsachen; für feste Körper sind sie in den meisten Fällen unzureichend.

Ich habe auf diesen Punkt besonderes Gewicht gelegt, weil sich daran eine wichtige allgemeine Unterscheidung knüpft zwischen solchen Zuständen, die gewissermassen auf sich beruhen und solchen, die auf frühere Vorgänge zurückzuführen sind.

87. Eine weitere Einzelheit dieses Unterschiedes ist, dass feste Körper, die durch eine bestimmte Reihenfolge von Veränderungen in einen Zustand gelangt sind, nicht immer durch die umgekehrte Reihenfolge in den Urzustand zurückkehren; die Umkehrung der Ursache bringt nicht stets die umgekehrte Wirkung hervor. Versetzt man eine Flüssigkeit aus einem Zustand in den anderen, so braucht man die Reihenfolge von Vorgängen, die dazu führte, nur umzukehren, damit sie auf demselben Wege in ihren Urzustand

zurückkehrt und Alles wieder so ist, als ob inzwischen keine Arbeit geleistet worden wäre. Anders verhalten sich feste Körper. Wenn man ein Stück Stahl durch ein bestimmtes Verfahren magnetisirt, und dieses dann in umgekehrter Reihenfolge wiederholt, so kehrt der Stahl weder auf demselben Wege, noch überhaupt in seinen Urzustand zurück. Wiederholt man mehrmals den Vorgang des Magnetisirens und Entmagnetisirens, so kann man den Körper schliesslich dahin bringen, einen Kreislauf von Veränderungen wenigstens annähernd durchzumachen. Aber er wird stets auf einem Wege hingelangen und auf einem anderen zurückkehren.

Wenn nun irgend ein Körper auf einem Wege aus dem Zustand A in den Zustand B und auf einem anderen Wege wieder von B nach A zurückversetzt wird, wie der Dampf in einer Dampfmaschine, so muss bei der Ausführung dieses Kreislaufs stets eine gewisse Arbeit durch den Körper oder an ihm geleistet werden. Beim Dampf ist die Rückkehr auf *anderem* Wege keine Nothwendigkeit; es kann also nach Belieben Arbeit geleistet werden oder nicht. Bei einem magnetisirten festen Körper aber ist keine andere Möglichkeit gegeben. Die aufsteigende Kurve des zunehmenden und die absteigende Kurve des abnehmenden Magnetismus decken sich nicht und können sich niemals decken. Wenn also ein Stück Eisen einen Kreislauf magnetischer Veränderungen durchmacht, so wird stets irgend eine Arbeit geleistet.

Das Produkt dieser Arbeit ist gewöhnlich Wärme;

ein mehrmals rasch hinter einander magnetisirtes und entmagnetisirtes Stück Eisen wird daher warm. Diese direkte erwärmende Wirkung ist aber sehr schwach und nur durch die „Transformatoren" der modernen Elektrotechnik fängt sie seit Kurzem an wahrnehmbar zu werden.[1])

Alle hierher gehörigen Eigenschaften des Eisens und anderer Substanzen nennt Ewing Hysterēsis (von ὑστερέω, zurückbleiben).

87 a. Ueber den mechanischen Vorgang des Magnetisirens und das Wesen der Kräfte, durch welche feste Körper den Magnetismus zurückbehalten, ist vor Kurzem eine wichtige Entdeckung gemacht worden. Man glaubte bisher, dass eine Art Reibung oder ein anderer mechanischer Zwang nothwendig sei, um die Molekeln in ihrer Lage festzuhalten, sodass sie dem drehenden Impuls der magnetischen Kräfte nur bis zu einem gewissen Punkt nachzugeben vermöchten, während darüber hinaus eine Art Zähigkeit sich geltend mache und sie in ihrer neuen Lage mehr oder weniger dauernd festlege. Ewing hat jedoch durch den Versuch gezeigt, dass einem aus polarisirten Molekeln bestehenden festen Körper hinreichende Festigkeit verliehen wird, wenn die Rotationsachsen der Molekeln unbeweglich

[1]) Die starke indirekte Erwärmung durch inducirte Ströme (sogenannte Foucault-Ströme) ist zu allgemein bekannt, als dass nicht ein blosser Hinweis darauf genügte, um eine Verwechslung mit der oben besprochenen auszuschliessen.

sind. Bei Atomen, die frei wandern, wie bei Flüssigkeiten, ist eine permanente Magnetisirung unmöglich; wenn sie aber verhindert werden, sich frei zu bewegen und um einen festen Mittelpunkt rotiren müssen, alsdann ergeben sich alle magnetischen Eigenschaften fester Körper aus der Einwirkung der magnetischen Kräfte auf diese polarisirten, sonst aber vollkommen freien Atome. Es bedarf dann keines mechanischen Zwanges mehr, um permanente Magnetisirung und Hysterēsis zu erklären, das Ganze ergiebt sich ohne Weiteres aus dem Verhalten einer Anzahl magnetisirter Theilchen, die innerhalb ihrer gegenseitigen Wirkungssphäre um feste Achsen rotiren, und kann sehr vollständig nachgebildet werden durch eine Gruppe drehbarer Kompassnadeln. Es ist dies ein bedeutender Schritt zur Vereinfachung und Aufklärung unserer Vorstellungen von der Konstitution fester Körper. Die Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen gehen bekanntlich in einander über und sind erklärbar durch die Annahme einer Anzahl gleichartiger Theilchen, die sich mehr oder weniger ihrer gegenseitigen Wirkungssphäre nähern. Wahrscheinlich wird man sich auch betreffs der festen Körper dieser Annahme anschliessen, mit dem Unterschiede, dass man sich die Molekeln nicht frei beweglich, sondern um feste Achsen rotirend denkt.

Noch einmal vom elektrischen Beharrungsvermögen

88. Auf einen Punkt muss ich an dieser Stelle aufmerksam machen. Die hier nach Ampère, Weber und Maxwell vorgetragenen Theorien des Magnetismus und Diamagnetismus beruhen auf der Voraussetzung, dass die Elektricität in vollkommenen Leitern dem ersten Gesetz der Bewegung gehorcht, das heisst, dass sie weiter fliesst, bis sie durch eine Gegenkraft aufgehalten wird. Diejenige Eigenschaft der Materie aber, die ihr diese Fähigkeit verleiht, ist das Beharrungsvermögen oder die Trägheit; das Gesetz heisst das Gesetz der Trägheit; und alle Stoffe, die sich in der geschilderten Weise verhalten, müssen unbedingt Beharrungsvermögen besitzen.

Nun darf man zwar eine so wichtige Folgerung nicht aus einer noch unerwiesenen Theorie ziehen; immerhin aber ist es bemerkenswerth, dass die lebendige Kraft eine wesentliche Bedingung der Ampèreschen Theorie des Magnetismus ist. Diese Theorie ist die einzige bisher aufgestellte und sie wird unhaltbar, wenn die Elektricität kein Beharrungsvermögen besitzt.

Nichtsdestoweniger ist es eine Thatsache, dass ein Elektromagnet sich nicht verhält wie ein Schwungrad oder ein Kreisel; eine lebendige Kraft ist durch mechanische Versuche nicht nachweisbar (§ 39). Sollte sich

dieser Satz definitiv bewahrheiten, so müssen wir also annehmen, dass der elektrische Molekularstrom aus zwei gleichen entgegengesetzten Strömen verschiedener Elektricitätsgattungen besteht, und uns entschliessen, die negative Elektricität nicht als eine blosse Negation oder Verminderung der positiven, sondern als eine Erscheinung für sich anzusehen. Ihre Beziehungen zur positiven Elektricität dürften mehr denen des Natriums zum Chlor, als denen der Kälte zur Wärme gleichen.

89. Dass Wirkungen des elektrischen Beharrungsvermögens durch *mechanische* Versuche nicht nachweisbar sind, ist unter der Annahme zwei gleicher entgegengesetzter Ströme verschiedener Elektricitäten sehr begreiflich. Man denke sich zwei Gummischläuche so zusammengebunden, dass sie eine Doppelröhre bilden und sende zwei Wasserströme in entgegengesetzten Richtungen hindurch. Dieser doppelte Strom besitzt keine gyrostatischen Eigenschaften und die einzige Art, wie sich unter diesen Umständen die lebendige Kraft des Wassers äussern kann, besteht im Widerstand gegen Veränderungen der Geschwindigkeit, ähnlich den Wirkungen des „Extrastroms" bei der Elektricität (§ 38).

Solange wir uns mit dem Fliessen der Elektricität in gewöhnlichen Leitern beschäftigten, konnten wir die Frage nach ihrem Beharrungsvermögen zum Theil umgehen, indem wir uns vorstellten, dass sie an jedem

Punkt ihrer Bahn fortbewegt würde durch eine Kraft, die gerade hinreicht, um an diesem einen Punkt den Widerstand zu überwinden; hierdurch wurde zwar die Form der Strömungslinien erklärt (§ 49) aber nicht die Erscheinungen der Selbstinduktion, nämlich das Zurückbleiben der Elektricität im Innern des Drahts beim Oeffnen und Schliessen des Stroms (§§ 43—48), noch weniger ihr vorübergehendes Beharren in der Bewegung nach Entfernung der treibenden Kraft.

Sobald wir es aber mit vollkommenen Leitern zu thun haben, bei denen eine treibende Kraft gar nicht existirt, ist das Fortdauern der Molekularströme unerklärlich ohne das Vorhandensein von Beharrungsvermögen oder einer Eigenschaft, die dieser so ähnlich sieht, dass sie zunächst denselben Namen verdient. Allerdings sind die Molekularströme selbst bis jetzt noch hypothetisch; dies ist der einzige Ausweg, der uns bleibt, um einer endgültigen Schlussfolgerung vorläufig aus dem Wege zu gehen (§§ 98 und 185).

KAPITEL IX

AUFBAU EINES MAGNETISCHEN FELDES

90. Wir wollen nun die verschiedenen Thatsachen und Erfahrungen durchgehen, die uns zu einer dualistischen Theorie der Elektricität geführt haben, einer Theorie, die in gewisser, wenn auch sehr modificirter Weise, zwei Fluida annimmt.

Da sind zunächst die alten Versuche, welche die Existenz einer besonderen negativen Elektricität unbestimmt vermuthen lassen:

(1) Der Wind, der von einer positiven oder negativen Spitze ausgeht. Eine Lichtflamme wird immer von der Spitze fortgeweht, sowohl wenn diese auf dem Conduktor der Elektrisirmaschine sitzt und das Licht in der Hand gehalten wird, als auch wenn die Spitze in der Hand gehalten und dem Licht auf dem Conduktor genähert wird. Aus demselben Grunde rotirt auch das elektrische Spitzenrad immer in derselben Richtung, einerlei ob man es an dem Conduktor anbringt

oder auf dem Erdboden in der Nähe des Conduktors befestigt.

(2) Gewisse die Funkenentladung begleitende Erscheinungen, z. B. bei dem alten Versuch von Wheatstone, bei dem durch Ueberspringen der Funken zwischen drei hintereinander geschalteten Luftstrecken die Geschwindigkeit der Elektricität bestimmt werden sollte; ferner der doppelte Wulst bei der Funkenentladung durch ein Stück Pappe, der die Vermuthung nahe legt, dass Etwas gleichzeitig in entgegengesetzten Richtungen die Pappe durchbohrt.

Alsdann haben wir folgende Ergebnisse neuerer Untersuchungen:

(3) Die Thatsache, dass das Volumen eines Dielektricums durch elektrostatische Spannung nahezu keine Veränderung erleidet. Hieraus dürfte man auf einen abscheerenden oder verschiebenden Druck schliessen, der nur die Form und nicht die Grösse verändert, d. h. auf eine gleichzeitige Verrückung der positiven Elektricität nach aussen und der negativen nach innen (§ 13).

(4) Die Erscheinungen der Elektrolyse und die doppelte Wanderung der Atome in entgegengesetzten Richtungen.

(5) Die Erscheinungen der Selbstinduktion und das Verhalten eines dicken Drahts gegen einen Wechselstrom. Ferner die Verzögerung beim Magnetisiren von

Eisen und besonders die Möglichkeit des permanenten Magnetisirens; sowie

(6) Das Fehlen der lebendigen Kraft beim elektrischen Strom und des Rotationsmomentes beim Elektromagneten (vgl. § 39), soweit mechanische Versuche dafür massgebend sind.

Ich gebe von vorn herein zu, dass viele dieser Punkte nur oberflächliche Anzeichen enthalten, die vor einer näheren Kritik kaum bestehen dürften; nur 3, 4, 5 und 6 können ernstlich in Betracht kommen; von diesen aber scheinen mir 5 und 6 zusammen eine Art vorläufigen hypothetischen Beweis zu liefern, der durch 3 erheblich gekräftigt wird.

Hier müssen wir den Gegenstand vorläufig wieder verlassen, kommen aber im § 118 und § 155 noch einmal darauf zurück.

Darstellung eines magnetischen Feldes

91. Jene Störung, die wir Magnetismus nennen und die wir im VII. Kapitel auf Wirbelerscheinungen — Rotiren um eine Achse — zurückführten, beschränkt sich keineswegs auf den Stahl oder das Eisen des Magneten, sondern verbreitet sich durch den ganzen umgebenden Raum und bildet das sogenannte magnetische Feld. Einen Plan dieses Feldes erhält man mit Hülfe von Eisenfeilspänen, die sich aneinandersetzen

und die Richtung der magnetischen Kraft an jedem Punkt anzeigen (Fig. 33).

Die so entstehenden Kraftlinien sind als die Achsen der Molekularwirbel anzusehen (Fig. 30). Sie sind Fortsetzungen entsprechender Linien in der Masse des Stahls, und jede Linie bildet eigentlich eine geschlossene

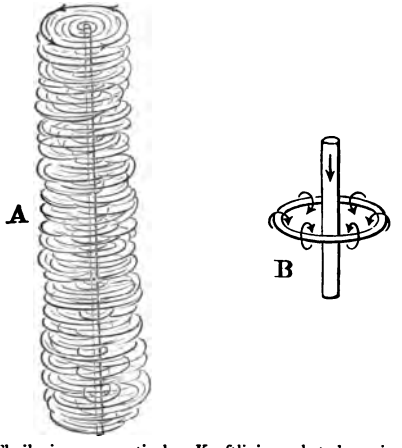


Fig. 30. — A. Theil einer magnetischen Kraftlinie, nebst dem sie umschliessenden elektrischen Wirbel. — B. Bruchstück eines elektrischen Stromkreises nebst einer der ihn umschliessenden Kraftlinien, die ihrerseits wieder von dem elektrischen Wirbel umschlossen ist; jede einen Strom umschliessende magnetische Kraftlinie bildet einen elektrischen Wirbelring. Vergl. Fig. 39.

Kurve, die zum Theil im Stahl, zum Theil in der Luft verläuft. Bei einer Drahtspule, wie auf Fig. 16 oder 29, befinden sich die ganzen Linien in der Luft, aber ein Theil ihrer Bahn geht durch die Spule, während der andere sich mehr oder weniger zwischen ihren beiden Enden ausbreitet.

Nach Ampère's Theorie besteht jedoch kein *wesentlicher* Unterschied zwischen einer solchen Spule und einem Stahlmagneten; sobald man die Ströme in den Molekeln des Magneten in Betracht zieht, löst sich das Ganze in Ketten und Molekularströme auf, die sich um eine gemeinsame, geschlossene Kurve oder Achse winden.

Jedes Atom, im Stahl sowohl wie in der Luft, ist der Sitz eines elektrischen Wirbels, der mehr oder weniger so gerichtet ist, dass sich seine Ebene durchschnittlich senkrecht zu den Kraftlinien befindet. Will man es vermeiden, die unvollständig gerichteten Wirbel mit in Betracht zu ziehen, so denke man sich am Besten sämmtliche Atome in zwei Systeme getheilt, solche, die genau übereinstimmend gerichtet sind, und solche, die sich nach jeder beliebigen Richtung wenden, und vernachlässige die letzteren.

92. Nun denke man sich eine Kette von Wirbeln als eine Reihe von rotirenden Kügelchen, die auf einem Draht aufgezogen sind, und vergegenwärtige sich die Wirkung, die eintreten würde, wenn eine materielle Flüssigkeit unter diesen Umständen rotirte. Offenbar würde sich die Flüssigkeitssäule bei der Rotation verkürzen und ihr Durchmesser zunehmen, wie auf Fig. 32. Eine Reihe derart parallel angeordneter Wirbel würde sich also zusammendrängen oder einen seitlichen Druck ausüben. Gleichzeitig würden die freien Längsachsen

danach streben sich zu verkürzen und eine Spannung in der Längsrichtung verursachen.

Die Achsen, solcher Wirbel können in Wirklichkeit nur frei sein an der Grenze des Mittels, wie z. B. an

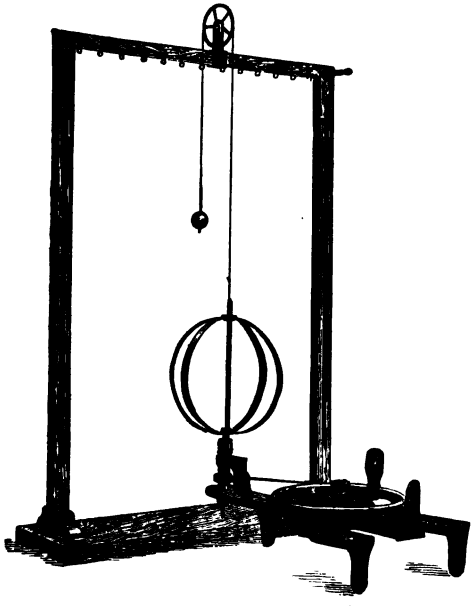


Fig. 31. — Erdkugel-Modell, das beim Rotiren eine axiale Spannung erzeugt, durch welche ein an der Achse befestigtes Gewicht emporgezogen wird, während das Ausbauchen der Wände einen seitlichen Druck ausübt.

der freien Oberfläche einer Flüssigkeit. Magnetische Wirbel sind eigentlich immer geschlossene Kurven; da sich aber ein Theil derselben in einem beweglichen Fluidum wie Luft und der andere Theil in einer

festen Masse wie Eisen oder Stahl befinden kann, so empfiehlt es sich, beide Theile zu unterscheiden; man kann sich also die Luftwirbel gesondert vorstellen, wie sie sich von einem Stück Eisen zu dem anderen erstrecken und durch ihr Streben nach Verkürzung oder ihre Centrifugalkraft die beiden Eisenstücke zu vereinigen suchen.

Der auf Fig. 31 abgebildete Apparat zeigt die Kraft, die ein rotirendes, elastisches Gestell längs und senkrecht zu seiner Rotationsachse ausübt.

Diese Wirkung eines Wirbels lässt sich auch in einer mit Flüssigkeit angefüllten Tasse bequem beobachten. Man versetze die Flüssigkeit in eine lebhafte kreisende Bewegung. Alsdann drückt sie stärker gegen die Wände als zuvor, sodass diese unter dem seitlichen Druck ausbauchen würden, wenn sie elastisch wären; zugleich wird das obere oder freie Ende der Rotationsachse hinabgesogen, sodass der Schwerkraft entgegen eine trichterförmige Senkung entsteht. Noch auffallender tritt die Erscheinung hervor bei dem auf Fig. 32 abgebildeten Apparat.

Zwei kreisförmige Brettchen sind durch eine kurze, breite, elastische Röhre verbunden; an dem unteren Brett ist ein Gewicht befestigt, das obere hängt an einer horizontalen, rotirenden Scheibe; die Trommel wird mit Wasser angefüllt und das Ganze in Bewegung gesetzt. Alsbald hebt die Längsspannung das

Gewicht, und der seitliche Druck drängt die Wände hinaus.

Es ist nicht nöthig, dass das ganze Gefäss sich dreht; wenn die Flüssigkeit inwendig rotirt, wird derselbe Zweck erreicht.

93. Nun denke man sich ein Mittel, das aus zahllosen derartigen, mit rotirender Flüssigkeit angefüllten

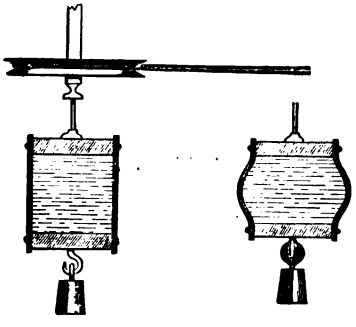
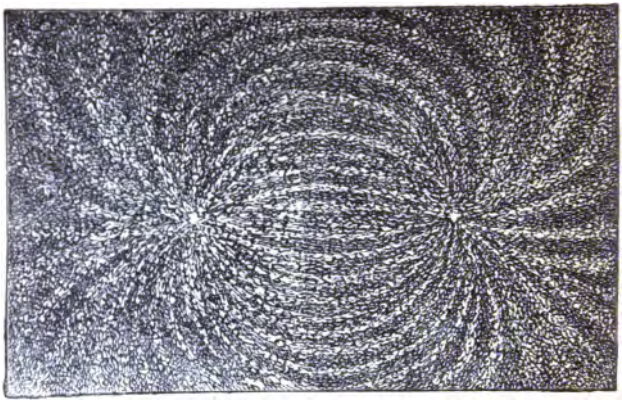
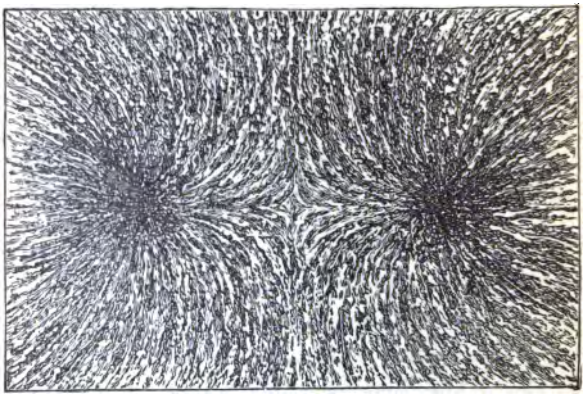


Fig. 32. — Cylindrisches Gefäss mit elastischen Wänden, das an einer rotirenden Scheibe hängt und mit Flüssigkeit angefüllt ist. Beim Rotiren hebt es vermöge seiner Centrifugalkraft ein Gewicht und dehnt sich seitlich aus; es veranschaulicht die Spannung längs und den Druck senkrecht zur Rotationsachse.

Zellen besteht; die Zellen seien entweder sehr lang oder eine an die andere angesetzt, sodass sie eine Kette, oder parallele Reihen von Ketten bilden; alsdann hat man das Bild eines magnetischen Mittels mit seinen Kraftlinien. Die äussersten Grenzen des Feldes streben danach sich einander zu nähern und stellen die magnetische Anziehung dar, während in seitlicher Richtung die Kraftlinien (die Achsen der Wirbel) sich gegenseitig



Anziehung.



Abstossung.

Fig. 33. — Anziehung und Abstossung. Die Spannung längs der Kraftlinien oder Rotationsachsen strebt das eine Paar Pole zu vereinigen; der senkrecht zur Achse auftretende, auf die Centrifugalkraft der Wirbel zurückzuführende Druck treibt das andere Paar Pole auseinander.

wegdrängen und die Abstossung erläutern. Dies ist Clerk Maxwell's Vorstellung von einem elektro-magnetischen Medium und von der Art, wie magnetischer Druck und magnetische Anziehung und Abstossung zwischen festen Körpern entsteht.

Da, wo die Kraftlinien von einem Körper zum anderen hinüberreichen, streben die Körper sich zu vereinigen, als würden sie von Gummibändern gezogen (Fig. 33); da aber, wo die Kraftlinien eines Körpers sich den Kraftlinien eines anderen Körpers *seitlich* darbieten, werden die Körper auseinander gedrängt.

KAPITEL X

MECHANISCHE MODELLE EINES MAGNETISCHEN FELDES

Erstes Schema eines durch einen Strom erzeugten Feldes

94. Kehren wir nun zurück zur Betrachtung eines einfachen Stromkreises; z. B. eines linearen Leiters, durch den wir einen Strom senden. Wie haben wir uns die Entstehung der Kraftlinien in dem Mittel vorzustellen und wie sollen wir uns die Ausbreitung der magnetischen Induktion veranschaulichen? Wir wollen zunächst davon ausgehen, dass der Strom das Feld erregt (obgleich das Umgekehrte sich vielleicht zuletzt als richtiger herausstellen wird).

Wenn man sich die Elektricität in den Molekeln des isolirenden Mittels ähnlich zusammenhängend denkt wie ein System von Zahnrädern, die gleichzeitig in einander und in die Zähne des metallischen Leiters eingreifen, so kann man sich leicht ein Bild davon machen,

wie die Rotation vom Strom aus seitlich übertragen wird: ganz wie eine in Bewegung begriffene Zahnstange eine Anzahl Triebe in Gang setzt, die gleichzeitig in einander und in die Zahnstange eingreifen (Fig. 34). Allein dann wird die eine Hälfte der Räder in der einen, die andere Hälfte in der anderen Richtung rotiren, eine Anordnung, die der Wirklichkeit nicht genau entspricht.

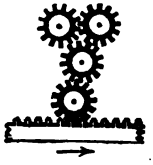


Fig. 34.

Auf welche Weise könnte ein System von parallelen Wirbeln durchweg in derselben Richtung rotiren?

Fig. 35.

Hängen sie zusammen, so müssen sie sich gegenseitig aufhalten, weil sie sich an der Berührungsstelle in entgegengesetzten Richtungen drehen; hängen sie nicht zusammen, wie kann sich alsdann die Rotation durch das Feld verbreiten?

Hier müssen wir wieder auf die alten Seilmodelle zurückkommen, deren wir uns bedienten, um die Elektrostatik zu erklären; jedoch fügen wir zu ihren übrigen Eigenschaften jetzt noch eine magnetische Wirbelbewegung hinzu. Wir veranschaulichten, wie erinnerlich, auf Fig. 5, 6 und 7a die Atome und die Elektricität durch Kügelchen, die auf ein Seil gereiht waren. Die Seile bedeuteten abwechselnd positive und

Fig. 36. — Reihen abwechselnd positiver und negativer Zellen, die in einander eingreifen und frei beweglich um feste Achsen rotiren.

negative Elektricität und wurden in entgegengesetzten Richtungen verschoben (siehe § 90).

Zu einer ähnlichen Anschauungsweise gelangen wir nun auch in Bezug auf die Anordnung der Zahnräder. Sie müssen, um richtig zu arbeiten, abwechselnd positive und negative Elektricität darstellen (Fig. 36). Rotiren sie *nun* abwechselnd in entgegengesetzten Richtungen, so ist Alles in Ordnung, und die elektrische Cirkulation oder Reaktion vollzieht sich in dem ganzen Felde in

einer Richtung. Jedes einzelne Rad erfasst und dreht das nächstliegende und so verbreitet sich die Rotation durch das ganze Mittel mit einer Geschwindigkeit, die von der Elasticität und Dichtigkeit des Mediums abhängt, welches bei derartigen Störungen betheiligt ist.

Vorläufig erscheint die Frage noch nicht angezeigt, ob die Zahnräder Stoffatome oder nur Elektricität darstellen. Es kann sein, dass jedes Atom elektrostatisch geladen ist und selbst rotirt; in diesem Falle würde die Ladung mitrotiren und dadurch den erwünschten Molekularstrom erzeugen; das scheinbare Beharrungsvermögen der Elektricität würde sich sehr einfach erklären als Beharrungsvermögen der rotirenden Atome; und die Unmöglichkeit, durch mechanische Mittel beim Elektromagneten ein Rotationsmoment nachzuweisen, würde sich gleichfalls erklären durch die gleichzeitige, entgegengesetzte Rotation der benachbarten Atome. Allerdings könnte die Frage entstehen, weshalb das Beharrungsvermögen der entgegengesetzten Molekeln genau gleich und entgegengesetzt sein sollte, was der Fall sein müsste, da ein flüssiges, magnetisirtes Mittel sonst körperlich rotiren würde; auch mögen noch andere Schwierigkeiten mit der körperlichen Rotation elektrostatisch geladener Molekeln verknüpft sein; sie ist aber auch bis jetzt eine blosse Möglichkeit, auf die kein Gewicht gelegt werden darf, bis sie festere Gestalt gewonnen hat. Für unseren gegenwärtigen Zweck genügt das Rotiren der Elektricität innerhalb der Atome, oder

sogar unabhängig von diesen, vollkommen. Da überdies die magnetische Induktion sich mit Leichtigkeit durch ein Vacuum ausbreitet, so muss das Räderwerk von materiellen Atomen im Wesentlichen unabhängig sein.

Wer an den leeren Zwischenräumen auf Fig. 36 Anstoss nimmt, sei auf Fig. 37 verwiesen, die gleiche Dienste leistet und die Schwierigkeit auf ein Minimum reducirt.

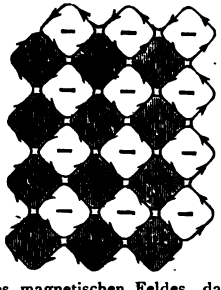


Fig. 37. — Abschnitt eines magnetischen Feldes, das senkrecht zu den Kraftlinien angeordnet ist. Abwechselnde entgegengesetzt rotirende Zellen. Andere Darstellungsweise der Fig. 36.

Diese Zahnradmodelle sind von mir nach dem Muster des im § 154 erwähnten Aethermodells von Professor Fitzgerald entworfen; dieses Modell ist in Bezug auf praktische Ausführbarkeit entschieden das Beste und weit zweckmässiger als das ursprüngliche Modell von Clerk Maxwell (siehe § 155), das allen derartigen Darstellungen von den Gleichungen eines magnetischen Feldes zu Grunde liegt.

Schema eines elektrischen Stromes

95. Man beachte nun, dass in einem so gearteten, magnetisirten Mittel, in welchem also das Räderwerk vollkommen korrekt arbeitet, ein Fortschreiten der Elektricität oder ein Strom in irgend einer Richtung nicht stattfindet. Denn, wenn an jeder Berührungsstelle zwischen zwei Rädern die positiven und negativen Elektricitäten mit derselben Geschwindigkeit in derselben Richtung sich bewegen, so ergiebt das keinen Strom. Nur wenn sich die positive Elektricität in der einen und die negative in der *entgegengesetzten* Richtung bewegt oder wenn die eine stillsteht oder wenigstens sich mit anderer Geschwindigkeit bewegt, kann die Elektricität fortschreiten oder strömen.

Nichtsdestoweniger kann ein Strom durch den auf Fig. 36 oder 37 abgebildeten Mechanismus leicht veranschaulicht werden; die Räder brauchen nur unvollkommen in einander einzugreifen und an einander zu gleiten. An solchen Gleitstellen bewegt sich die positive Elektricität schneller als die negative, oder umgekehrt; hier entsteht also ein Strom. Eine zusammenhängende Reihe solcher Gleitstellen entspricht mithin einem linearen Strom. Wenn man sich das klar macht, so wird man begreifen, dass eine Reihe gleitender Räder stets einen Ring bilden muss, mit anderen Worten, dass die Elektricität stets in einem geschlossenen Kreise fliessen

muss (§ 4). Denn, wenn ein einzelnes Rad gleitet, so beschränkt sich der Stromkreis auf die Peripherie dieses Rades; wenn eine Reihe gleitet, so befinden sich der Hin- und Rückstrom auf den entgegengesetzten Seiten der Reihe. Endlich, wenn ein grosser Raum von beliebiger Gestalt, in dem alle Räder korrekt arbeiten, von einer Reihe gleitender Räder eingeschlossen ist, so haben wir einen Stromkreis von beliebiger Gestalt, aber immer einen geschlossenen Stromkreis. Wohlverstanden hat man sich den Strom nicht als eine räumliche *Fortbewegung* der Räder vorzustellen; diese können feste Achsen haben; es handelt sich nur um ein Gleiten der *Ränder* an einander.

Man denke sich sämmtliche Räder innerhalb des leeren Rahmens auf Fig. 38 rotirend, die positiven im Sinne des Uhrzeigers, die negativen umgekehrt. Dagegen sollen die Räder ausserhalb des Rahmens stillstehen oder sich mit einer anderen Geschwindigkeit oder in entgegengesetzter Richtung bewegen; alsdann ist die Grenze des inneren Systems eine solche Linie, wo die Räder gleiten, das heisst wo die positiven Ränder im Sinne des Uhrzeigers und die negativen Ränder entgegengesetzt rotiren. Diese Grenze stellt also einen im Sinne des Uhrzeigers sich bewegenden positiven Strom dar, der den inneren Rand des leeren Rahmens umkreist.

Man kann indessen einwenden, dass, wenn die Rotation innerhalb des Rahmens fortdauert, die äusseren

Räder früher oder später ihre Geschwindigkeit den inneren mittheilen müssen und die Gleitung aufhören wird. Dem ist in der That so, es sei denn, dass der Zusammenhang zwischen dem inneren und äusseren System vollständig unterbrochen ist, wie auf Fig. 38.

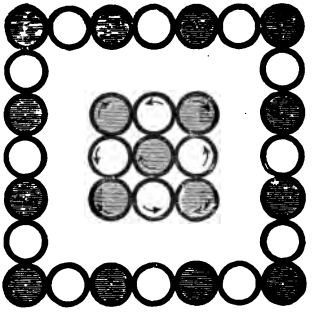


Fig. 38. — Diagramm eines peripherischen Stroms, der von dem umgebenden Mittel durch einen vollkommenen Leiter getrennt ist, welcher keine Bewegung überträgt, mithin einen vollkommenen magnetischen Schirm bildet. Siehe auch § 101 und Fig. 41. Die schraffirten Räder bedeuten positive Elektricität. Der Strom läuft im Sinne des Uhrzeigers um die äussere Grenze des inneren Rädersystems.

Besteht irgend ein Zusammenhang zwischen beiden, so können die Räder nur vorübergehend gleiten und zwar nur solange die Periode der Beschleunigung dauert.

Unterschied zwischen einem Dielektricum und einem Metall in Bezug auf ihr Verhalten gegen ein veränderliches magnetisches Feld

96. In einem Dielektricum ist der Zusammenhang zwischen den Atomen ein bestimmter und vollständiger. Wenn das eine sich dreht, muss das nächste sich auch drehen, und die in einander eingreifenden gezahnten Flächen gleiten niemals. Der Bau eines Dielektricums entspricht also dem auf Fig. 36 abgebildeten Zahnradsystem. Stromleitung ist darin unmöglich.

In metallischen Leitern dagegen ist der Eingriff unvollkommen. Es ist ein Fall von Reibungskuppelung mit mehr oder weniger Schmierung und Gleitung, sodass ein rotirendes Rad das nächstliegende zwar schnell aber doch nicht augenblicklich in Gang setzt. Es entsteht daher eine Bewegung des positiven Randes, die durch die gleiche, gleichzeitige Bewegung des anstossenden negativen Randes ungenügend kompensirt wird, bis dieser in Gang kömmt; mit anderen Worten, es findet ein vorübergehender elektrischer Strom statt, bis die Räder ihre volle Geschwindigkeit erlangt haben.

In *vollkommenen* Leitern sind die Räder ganz ungezahnt. Die Schmierung ist so vollkommen, dass die Atome ganz unabhängig von einander sind. In einem derartigen Mittel kann daher eine Rotation überhaupt nicht fortgepflanzt werden. Der einzige in einem voll-

kommenen Leiter mögliche Strom ist eine auf die äusserste Oberfläche beschränkte Erscheinung. (Siehe auch Kap. V und § 104.) [1])

Ein magnetisirtes Mittel, welcher Art es auch sei, hat man sich also zu denken als erfüllt von rotirenden Rädern, von denen sich die positiven in der einen, die negativen in der anderen Richtung drehen. Ist das Mittel nicht magnetisirt, sondern nur magnetisch, das heisst magnetisirbar, so kann man sich denken, dass seine Räder entweder stillstehen, oder beliebig nach allen Richtungen gewendet sind. Letztere Vorstellung ist wahrscheinlich die richtigere, erstere ist vorläufig die leichtere.

Ob das Mittel isolirt oder leitet, bleibt sich gleich in Bezug auf die allgemeine Thatsache, dass in seinem Innern, überall wo Kraftlinien hindurchgehen, Räder rotiren. In einem leitenden Mittel aber ist der Eingriff der Räder unvollkommen; dementsprechend zeigt sich während der veränderlichen Stadien eines magnetischen Feldes, wenn seine Wirbelbewegung zu- oder abnimmt, ein sehr wichtiger Unterschied zwischen isolirender

[1]) Man hat mich darauf aufmerksam gemacht, dass obgleich in vollkommenen Leitern durch seitliches Einwirken des umgebenden Mittels kein Strom erzeugt werden könne, das Entstehen thermo-elektrischer, durch Kontaktkraft erzeugter Ströme in seinem Innern nicht ausgeschlossen sei. Ich möchte jedoch dagegen einwenden (§ 62), dass in einem vollkommenen Leiter keine thermo-elektrischen Kräfte vorhanden sein können, weil er nicht im Stande ist, die Elektricität festzuhalten.

und leitender Materie. In leitender Materie gleiten die Räder überall, solange die Periode der Beschleunigung dauert und es vergeht eine gewisse Zeit, bis ein konstanter Zustand erreicht ist. In dielektrischer Materie braucht die Wirbelbewegung zwar ebenfalls eine endliche Zeit um sich fortzupflanzen; diese ist aber ausserordentlich kurz und der Vorgang vollzieht sich ohne Gleitung durch eine leichte zurückschnellende Federung (Siehe §§ 103 u. 159).

97. Stark magnetische Substanzen, wie Eisen, Nickel und Kobalt, hat man sich als ebenso konstituirt vorzustellen, nur dass ihre Räder viel massiger oder viel zahlreicher oder beides zugleich sind. Die Grösse, die wir in den §§ 82, 83 als Permeabilität bezeichneten und durch den Buchstaben μ ausdrückten, kann man jetzt als der Dichtigkeit des magnetischen Mittels aequivalent ansehen; sodass Substanzen mit grossem μ einen magnetischen Mechanismus oder ein Räderwerk von ausserordentlicher Massigkeit besitzen.

Erscheinungen, die mit einem veränderlichen Strom verknüpft sind. Wesen der Selbstinduktion

98. Man vergegenwärtige sich nun, was in der Umgebung eines Leiters geschieht, in dem ein Strom entsteht, wie dies im V. Kapitel zum Theil geschildert wurde. Ohne den Vorgang in erschöpfender Weise

darstellen zu wollen, kann man sich doch mechanische Vorrichtungen denken, die den elektrischen Erscheinungen einigermassen analog sind.

Zunächst stelle man sich ein in einander greifendes System von Zahnrädern vor, das an einer Stelle durch eine Zahnstange in Bewegung gesetzt wird. Man achte

Fig. 39. — Vorläufige Darstellung eines Stroms, der ein umgebendes Dielektricum entweder treibt oder von ihm getrieben wird. Längsschnitt des Drahts. Vergl. Fig. 30B.

hauptsächlich auf jedes zweite Rad, das positive Elektricität darstellt. Die dazwischen liegenden negativen Räder sind nothwendig um die Bewegung fortzupflanzen und dienen gleichzeitig dazu, das Fortschreiten der positiven Elektricität in irgend einer bestimmten Richtung zu neutralisiren, ausgenommen da, wo die Räder gleiten; sonst interessiren sie uns nicht.

Man erinnere sich, dass jedes Rad Beharrungsvermögen besitzt, wie ein Schwungrad (§ 88).

Sobald die Zahnstange sich bewegt, fangen die Räder an zu rotiren und erlangen sämmtlich binnen Kurzem ihre volle Geschwindigkeit. Bis dies geschieht, hat die Zahnstange eine Gegenkraft zu überwinden, die nicht auf Reibung oder gewöhnlichem Widerstand, sondern auf der Trägheit des Räderwerks beruht.

Diese Trägheit stellt dasjenige dar, was wir Selbstinduktion nennen und seine Wirkung ist der sogenannte „Extrastrom beim Schliessen" oder richtiger die elektromotorische Gegenkraft des elektro-magnetischen Beharrungsvermögens oder der Selbstinduktion.

Ist die Zahnstange einmal in Gang gesetzt, so übt das Räderwerk keine Wirkung mehr auf sie aus, solange sie sich mit konstanter Geschwindigkeit vorwärts bewegt; aber wenn sie zum Stillstand gebracht werden soll, so gelingt dies nur unter Anwendung von Gewalt; das Beharrungsvermögen des Räderwerks treibt sie noch eine Zeit lang weiter und man erhält den sogenannten „Extrastrom beim Unterbrechen".

99. Nimmt man nun an, dass die Zahnstange die in einem Kupferdraht fortschreitende Elektricität darstellt, so kann man das Diagramm als Längsschnitt eines vollständigen Feldes ansehen; das ganze Feld erhält man, wenn man das Diagramm um die Achse der Zahnstange rotiren lässt. Geschieht dies, so wird man finden, dass die Achse jedes Rades sich zu einem kreis-

förmigen Kern verlängert und jedes Rad zu einem Wirbelring wird, der die Zahnstange umschliesst und an ihr hinabrollt, während sie sich vorwärtsbewegt, ähnlich wie wenn man einen Stab durch einen enganschliessenden Gummiring schiebt. (Siehe Fig. 30 B.)

Je weiter man sich von der Zahnstange entfernt, um so länger werden die kreisförmigen Achsen der Wirbel; da sich aber auf die zunehmende Stoffmenge eine gegebene Wirbelbewegung vertheilt, so ist ersichtlich, dass die Rotation in dem Grade abnehmen muss, in dem die Entfernung wächst und dass in einer entsprechenden Entfernung von dem Leiter das Mittel fast gar keine Störung mehr erleiden wird.

100. Um zu erfahren, wie weit das Mittel unter der Einwirkung eines gegebenen Stromkreises rotirt, muss man dessen Gestalt, das heisst die Lage seiner Rückleitung kennen.

Man nehme zunächst eine lange, schmale Drahtschleife und leite einen Strom auf der einen Seite hin, auf der anderen zurück. Die von jeder Leitung ausgehenden Rotationen decken einander, und obgleich sie innerhalb der Schleife die gleiche Richtung haben, bewegen sie sich ausserhalb der Schleife in entgegengesetzten Richtungen. Das Mittel ausserhalb eines derartigen Leiters ist daher fast gar keiner Störung unterworfen; es wird überhaupt nur ein kleiner Theil des Dielektricums gestört; mithin ist das Beharrungs-

vermögen oder die Selbstinduktion sehr klein. (Siehe Fig. 40.)

Wenn aber die Drahtschleife sich ausdehnt und einen grösseren Raum umschliesst, wozu die Centrifugalkraft der Räder sie zu nöthigen strebt, alsdann findet eine lebhaftere Rotation statt, die lebendige Kraft

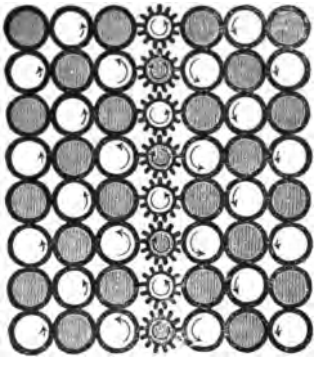


Fig. 40. — Diagramm einer dicht neben einander liegenden Hin- und Rückleitung, welches zeigt, wie das Rotiren und Gleiten der Räder in der Dicke des Leiters und in dem dazwischenliegenden Dielektricum vertheilt sind. Das äussere Dielektricum unterliegt fast gar keiner Störung. Die glatten Räder bedeuten einen metallischen Leiter, die gezahnten Räder bedeuten eine dünne dielektrische Schicht zwischen der Hin- und Rückleitung des metallischen Stromkreises.
Ueber zwei in derselben Richtung fliessende Ströme siehe Fig. 44.

im Innern besitzt ein grösseres Moment, mithin wächst die Selbstinduktion. Da jedoch die Achse jedes Rades eine geschlossene Kurve bildet und ausserhalb der Schleife zurückkehren muss, wird auch die äussere Umgebung von der Rotation berührt, aber in einer der inneren Bewegung entgegengesetzten Richtung.

101. Fig. 38 und 41 zeigen den Vorgang bei einem geschlossenen Stromkreis. Der leere Rahmen auf Fig. 38 stellt einen vollkommenen Leiter oder eine vollständige Unterbrechung des Zusammenhanges zwischen den Zahnrädern dar. Um die innere Begrenzung

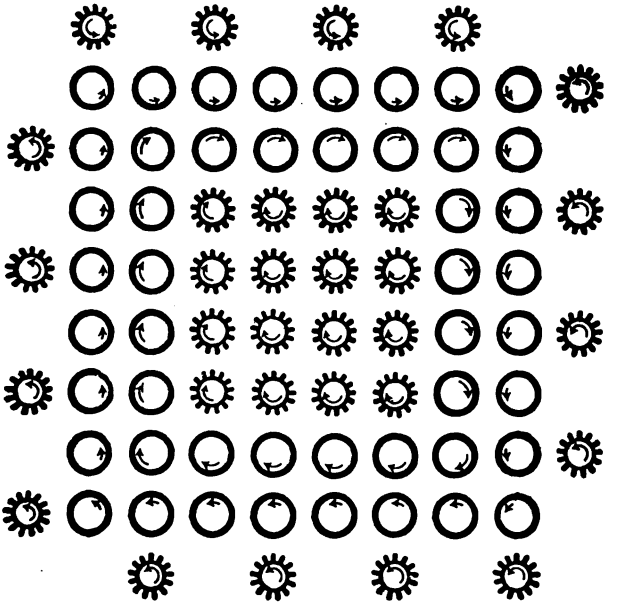


Fig. 41. — Diagramm eines einfachen leitenden Drahtringes oder einer Galvanometerwindung. Die negativen Verbindungsrädchen sind weggelassen. Es sind innerhalb und ausserhalb des Leiters gleichviel dielektrische Räder gezeichnet, um zu veranschaulichen, dass die Rotation innerhalb und ausserhalb gleich ist, obgleich sie sich ausserhalb auf eine grössere Stoffmenge vertheilt und daher schwächer auftritt. Das Diagramm zeigt einen positiven Strom, der im Sinne des Uhrzeigers konstant um die Windung fliesst, nebst der dazu gehörigen Vertheilung des Magnetismus. Querschnitt in der Ebene der Windung. Man achte nicht blos auf die Richtung der Pfeile, sondern auch auf ihre Länge.

dieses Rahmens sieht man die positive Elektricität in der Pfeilrichtung kreisen; unabhängig davon könnte sie auch um die äussere Begrenzung kreisen: das Innere des vollkommenen Leiters würde dadurch in keiner Weise berührt. Er ist deshalb als leerer Raum abgebildet.

Der entsprechende Theil auf Fig. 41 soll einen gewöhnlichen Leiter darstellen, dessen Zahnräder gleiten können. Die Gleitung muss in diesem Fall andauern, weil sich die Räder auf beiden Seiten des Leiters in entgegengesetzten Richtungen drehen; die Atome müssen sich also diesen Bedingungen anpassen, so gut es geht; einige rotiren in der einen, andere in der anderen Richtung, und noch andere, die sich auf einer gewissen neutralen Linie im Leiter befinden, stehen still. Ist der Leiter gerade und unendlich lang, so befindet sich diese neutrale Linie in der Mitte. Ist er eine Schleife, so nähert sie sich der äussersten Begrenzung, weil das Mittel innerhalb der Schleife am stärksten rotirt. Wird die Schleife so eng zusammengebogen, dass sie garkeinen Raum mehr umschliesst, so liegt die neutrale Linie nahezu auf der äussersten Begrenzung (Fig. 40). Wird endlich der leitende Draht um einen Ring gewickelt, alsdann sind die Achsen der Wirbel ganz in den Draht eingeschlossen und es findet ausserhalb desselben garkeine Rotation statt.

Fig. 42 zeigt einen Querschnitt unter diesen Be-

dingungen. Die Räder des äusseren Dielektricums drehen sich garnicht. Das innere rotirt, vielleicht sogar ungemein heftig; wir haben also zwischen den inneren und äusseren Schichten des Leiters eine starke Gleitung und einen grossen Verlust an Energie — mit anderen Worten einen starken Strom.

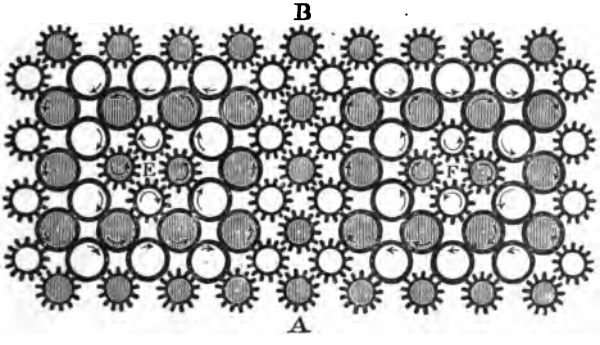


Fig. 42. — Querschnitt eines geschlossenen magnetischen Kreises oder elektrischen Wirbelringes oder hohlen gebogenen Solenoids, wie auf Fig. 29, der einen aus Luft gebildeten Ringanker umschliesst. *A B* ist die Achse des Ringes. *E* und *F* sind die Querschnitte seines Kerns. Die Länge der Pfeile bezeichnet die Intensität der Rotation, das heisst des magnetischen Feldes. Sie erreicht in der Mitte jedes Querschnitts ihr Maximum und ist ausserhalb gleich Null. Besteht der Kern aus Eisen statt aus Luft, so müssen seine Räder 100 bis 10 000 Mal massiger gedacht werden; ist das Eisen massiv, so gleiten die Räder; besteht er aus einem Bündel dünner lackirter Drähte, so sind die Räder gezahnt. Vergl. Fig. 47.

102. Diese oben geschilderte Gleitung vollzieht sich in jedem Leiter, durch den ein Strom, sei er konstant oder veränderlich, befördert wird; *sie ist überhaupt selbst der Strom.* Sie ist stets verbunden mit einem Verlust an Energie und der Erzeugung von Wärme —

nur in einem vollkommenen Leiter kann sie ohne Reibung stattfinden. Bei einem constanten Strom vertheilt sich die Gleitung gleichmässig durch den ganzen Querschnitt des Leiters. Während der veränderlichen Stadien ist sie ungleichmässig vertheilt; sie concentrirt sich alsdann mehr auf die Peripherie des Drahts, wie ich durch die Diagramme zu veranschaulichen suchte und im § 43 schilderte.

Beim Schliessen eines Stroms werden die äussersten Schichten des Drahts zuerst erregt und die Bewegung schreitet stufenweise, obgleich sehr rasch, bis zur Achse vor. Die Verzögerung oder Selbstinduktion in einem Draht ist daher um so grösser, je dicker er ist und je besser das Material leitet, aus dem er besteht. Wählt man Eisen, so wird die Masse oder Anzahl der Räder so gross, dass die Verzögerung erheblich zunimmt. Die Rotation seiner äusseren Schichten ist alsdann so stark, dass sie im Stande ist die von Herrn Hughes experimentell nachgewiesenen Wirkungen hervorzubringen (vergl. § 43).

Gleitung darf niemals mit Rotation verwechselt werden. Gleitung ist Strom, Rotation ist Magnetismus. Die Räder, die sich auf der Achse eines geraden, unendlichen, stromleitenden Drahts befinden, stehen still und wenn man sich von der Achse entfernt, rotiren sie auf beiden Seiten nach entgegengesetzten Richtungen, sodass kreisförmige Wirbelkerne um die Achsen ent-

stehen (Fig. 30 B). Die Gleitung dagegen ist gleichmässig durch den ganzen Draht vertheilt, sobald der Strom constant geworden ist. Die Gleitung vollzieht sich nur in der Richtung des Drahts. Die Rotationsachsen befinden sich stets im rechten Winkel zu dieser Richtung.

KAPITEL XI

MECHANISCHE MODELLE VON STROM-INDUKTION

Entstehen eines inducirten Stroms in einem sekundären Stromkreis

103. Um sich klar zu machen, wie sich ein auf beliebige Art erregtes Feld in einem leitendem Mittel verbreitet, betrachte man Fig. 43 und denke sich den Raum innerhalb des Quadrats A B C D als einen gewöhnlichen leitenden Raum, das heisst als erfüllt mit Rädern, die schlecht in einander greifen und gleiten können.

Sobald die Zahnstange sich bewegt, fangen alle Räder ausserhalb des Quadrats A B C D an sich zu drehen und erlangen bald ihre volle Geschwindigkeit. Die äusserste Räderschicht innerhalb des Quadrats fängt gleichfalls an zu rotiren, aber nicht sofort; es dauert eine gewisse Zeit bis sie in Gang kommt; noch länger dauert es, bis sich die nächste Schicht bewegt u. s. w.;

zuletzt dringt jedoch die Bewegung überall hin vor und ein dauernder Zustand tritt ein.

Aber während die Räder in Bewegung gesetzt wurden, fand auf der Linie A B C D und auf allen concentrischen Linien innerhalb derselben Gleitung statt; der Rand der positiven Räder bewegte sich entgegen-

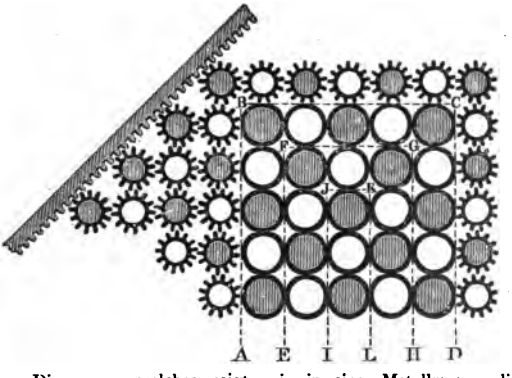


Fig. 43. — Diagramm, welches zeigt, wie in einer Metallmasse, die in ein zunehmendes magnetisches Feld eingeführt wird, ein inducirter Strom entsteht und vergeht. A B C D sind die Grenzen der Metallmasse. Die punktirten Linien A B C D, E F G H, I J K L sind die concentrischen Linien, auf denen die Räder gleiten.

gesetzt der Richtung des in die Zahnstange eingreifenden Rädersystems und gab so ein Bild davon, wie in einem Leiter in der Nähe eines zunehmenden Stromes oder überhaupt in einem zunehmenden magnetischen Feld beim „Schliessen" der entgegengesetzte Strom erregt wird.

Das allmähliche Vordringen der Bewegung und das

Aufhören der Gleitung veranschaulicht alsdann die Art, wie dieser inducirte Strom anwächst, um allmählich wieder zu vergehen, sobald das magnetische Feld (d. h. die Rotation) in das Innere sämmtlicher Leiter eingedrungen ist und sie dauernd beherrscht.

Nun denke man sich, dass die Zahnstange plötzlich angehalten wird; alsdann bleiben alle gezahnten Räder gleichfalls stehen, wenn auch infolge ihrer lebendigen Kraft nicht ohne einen Ruck und heftige Oscillationen. Die Räder innerhalb des Quadrats A B C D dagegen drehen sich noch eine Zeit lang weiter. Die äusserste Schicht dieses Systems gleitet in der Richtung, die den direkten inducirten Strom bei der „Unterbrechung" veranschaulicht, und steht zuerst still. Das Gleiten und Stillstehen dringt dann allmählich nach innen vor, genau so wie zuvor die umgekehrte Bewegung, bis jede Spur einer Rotation aufhört. Dieser umgekehrte Vorgang entspricht dem direkten inducirten Strom beim „Unterbrechen".

104. Durch einen vollkommenen Leiter würde die Störung niemals übertragen werden, denn die dielektrischen Räder an seiner Oberfläche würden mit solcher Vollkommenheit gleiten, dass sie die Bewegung niemals den inneren Schichten mittheilen könnten. Es würde nichts weiter entstehen, als ein oberflächlicher Strom, der ins Unbegrenzte oder vielmehr solange fortdauern würde, wie das magnetische Feld (die Rotation der dielektrischen Räder) andauert und der Leiter

würde für jedes hinter oder in ihm befindliche Dielektricum einen vollständigen magnetischen Schirm bilden. Ein derartiger vollkommener Leiter ist durch den leeren Rahmen auf Fig. 38 dargestellt. Ein magnetisches Feld oder eine Wirbelbewegung, die ausserhalb dieses Rahmens erregt wird, kann sich niemals dem inneren Rädersystem mittheilen; und umgekehrt. (§ 153.)

105. Man wird nunmehr begreifen, dass ein rotirendes Schwungrad das mechanische Ebenbild des Magnetismus oder, genauer ausgedrückt, des Querschnitts einer magnetischen Kraftlinie oder Kraftröhre ist; und dass ein Hebel, der entweder beschleunigend oder hemmend auf das Schwungrad einwirkt, nebst der Gleitung, dem Verbrauch an Energie und der Erzeugung von Wärme, die dadurch eintreten, den elektrischen Strom mechanisch veranschaulichen.

Ein magnetisches Feld soll man sich demnach denken als erfüllt von einem System elastischer Wirbel, deren einige zahnradartig in einander greifen, während andere nur mit glatten Rändern gegen einander angepresst sind. Diese letzteren können gleiten und an den Stellen, wo sich solche Räder befinden, können Ströme entstehen. Die hierbei verbrauchte Energie wird von der Kraftquelle aus durch die nichtgleitenden oder dielektrischen Theile des Feldes übertragen, genau so wie die Energie einer Dampfmaschine durch Getriebe oder Wellen an diejenigen Stellen befördert wird, wo sie durch Reibung verbraucht werden soll. (Siehe §§ 42—44.)

Uebertragung der Energie in die Ferne

106. Wir wollen nun versuchen, uns die Bedeutung eines Telegraphendrahtes von diesem Gesichtspunkt aus klar zu machen. Angenommen, dass wir an einem Ort ein magnetisches Feld erregt haben, wie können wir es derart in die Ferne übertragen, dass an einem anderen Ort Magnetnadeln in Bewegung gesetzt und Signale ausgeführt werden? Der erste Gedanke, der sich darbietet, ist folgender: Da es keinen vollkommenen Leiter oder absoluten magnetischen Schirm giebt, so ist das Feld eines jeden Magneten vollständig unbegrenzt; es erstreckt sich also schon bis zu dem entfernten Ort hin. Man nehme *hier* einen langen Eisenstab, den man nach Belieben magnetisiren und entmagnetisiren kann, *dort* ein sehr empfindliches Magnetometer und die Aufgabe ist gelöst. In der That liegt kein Grund vor, weshalb man nicht versuchen sollte, unter gewissen Bedingungen auf diese Art über kurze Strecken ohne Draht zu signalisiren. Da jedoch die durch einen gegebenen Magneten verursachte Wirkung umgekehrt proportional dem Quadrat seiner Entfernung ist, so liegt es auf der Hand, dass die Kraft eines Magneten, selbst wenn er mehrere Meter lang wäre, schon in einer Entfernung von einigen Kilometern ausserordentlich schwach wird.

Ein zweiter Gedanke würde dahin gehen, einige der

magnetischen Kraftlinien vermittelst eines eisernen Stabes oder Drahts nach dem entfernten Ort hinzuleiten. Ein Draht aus weichem Eisen eignet sich hierzu soviel besser als Luft, dass eine sehr lange eiserne Schleife, die an einem Ende durch eine magnetisirende Drahtspule, am anderen durch eine Empfängerspule hindurchgeht, eine gewisse Verbindung zwischen beiden Orten herzustellen vermag. Erzeugt man nämlich an einem Ende einen primären Strom, so entsteht am anderen ein sekundärer inducirter Strom. Dies wäre ein magnetischer Telegraph, durch den eine magnetische Wirbelbewegung nur längs eines Drahtes fortgepflanzt und ein Strom an dem entfernten Ort erregt würde.

Nun sind aber der Stromkreis und der magnetische Kreis vertauschbar; der Gedanke liegt also nahe, die lange magnetische Schleife, deren Enden mit kleinen Stromwindungen umwickelt sind, durch eine lange Stromschleife zu ersetzen, deren Enden durch kleine magnetische Windungen hindurchgehen. Ebendies ist bei dem elektrischen Telegraphen der Fall. Diese Anordnung ist aus folgenden Gründen vorzuziehen: Eisen leitet den Magnetismus ungefähr 1000 mal besser als Luft, aber nicht unendlich viel besser; mithin würden sehr viele Kraftlinien unterwegs aus der eisernen Schleife austreten und einen kürzeren Kreis durch die Luft zurückbeschreiben. Kupferdraht dagegen ist ein fast unendlich viel besserer Leiter der Elektricität als

Guttapercha oder Porzellan. Ein elektrischer Telegraph ist daher zweckmässiger als ein magnetischer.

Die Leitfähigkeit von Blei oder Neusilber ist eine Million mal grösser als die verdünnter Schwefelsäure, und doch würde man nur mit sehr geringem Erfolge vermittelst eines blanken Drahtes aus Blei oder Neusilber durch ein Meer verdünnter Schwefelsäure signalisiren können. Bei einem entsprechenden magnetischen Stromkreis aus Eisen wäre der Verlust noch weit grösser.

107. Worin besteht nun die eigentliche Wirksamkeit des Drahtes beim elektrischen Telegraphen? Wir sehen, dass ein magnetisches Feld an einem Ende mit sehr geringem Verlust ein magnetisches Feld am anderen Ende erzeugt; mit Hülfe des Drahtes wird fast das ganze Feld am anderen Ende concentrirt. Der Draht befähigt uns also, die magnetischen Erscheinungen in jeder beliebigen Richtung fortzuleiten und an jeder Stelle nach Wunsch hervorzurufen. Man sagt zwar gewöhnlich, dass ein Strom in dem Draht fliesse; aber seit wir den Strom nur als ein unvollkommenes Ineinandergreifen des Zahnradsystems im magnetischen Mittel erkannt haben, wissen wir, dass eigentlich nichts durch den Draht hindurchgeht.

Wir wollen der Einfachheit halber annehmen, dass der Draht ein vollkommener Leiter ist. Das magnetische Räderwerk, das alles erfüllt und die magnetische Wirbelbewegung überall hin fortpflanzt, hört an seiner

Oberfläche auf und theilt ihm nichts mehr mit. Er ist, elektrisch betrachtet, nichts als eine willkürlich geformte Reihe von gleitenden Rädern, die das magnetische Feld durchschneidet und verändert. Bis an seine Oberfläche dringt die magnetische Wirbelbewegung vor; dort hört sie auf.

In wie fern befähigt dieser Umstand den Draht, Signale zu befördern? Das haben wir uns klar zu machen.

Man greife zurück auf Fig. 30 B und betrachte sie im Lichte der Fig. 39; diese aber fasse man nur als einen Schnitt auf, sodass der einzelne Pfeil auf Fig. 30 B dasselbe bedeutet wie je ein Zahnrad auf Fig. 39. Ferner denke man sich die Zahnstange auf Fig. 39 ganz fort oder ersetze sie durch einen vollständig glatten Stab, lasse jedoch die Räder auf irgend eine Art weiterrotiren, genau als wenn sich die Zahnstange noch vorwärts bewegte. Alsdann haben wir an der Oberfläche des unbeweglichen oder nicht vorhandenen Stabes jene Gleitung, die wir jetzt als Strom anzusehen gelernt haben. Welche Rolle spielt nun der Stab oder der leere Raum, den er ausfüllt? Er gestattet dem Räderwerk auf beiden Seiten in entgegengesetzten Richtungen zu rotiren; wäre er nicht da, und liesse man die Zähne über den Raum weg in einander eingreifen, so würden sie sich sofort festklammern und die Bewegung würde aufhören.

Entfernen wir den langen Leiter, so bleibt nichts

als die gewöhnliche Rotation um die Kraftlinien, die mit der Entfernung rasch abnimmt; behalten wir ihn dagegen, so dient er den Wirbeln als Kern und verändert das Bild total. In einiger Entfernung vom Draht ist das Feld schwach; aber in seiner Nähe ist es stark; er ist in seiner ganzen Ausdehnung umgeben von einem intensiven magnetischen Feld, wie auf Fig. 30 B, das durch die Länge des Drahtes absolut nicht abgeschwächt wird.

Damit sich der Draht in dieser Weise verhält, muss er einen geschlossenen Kreis bilden und irgendwo mit einer motorischen Kraftquelle versehen sein, die ihn an dieser einen Stelle mit Wirbelkernen umgiebt. Sind diese Bedingungen gegeben, so wandern die Wirbelkerne unaufhaltsam an ihm entlang, so lang er auch sein mag, und erzeugen am anderen Ende ihre Wirkungen.

Es ist nicht ganz leicht, ein Diagramm von diesem Vorgang zu entwerfen, weil es zahllose Räder bedingen würde, und diese das Abnehmen der Wirbelbewegung im Verhältnisse zur Entfernung nicht gut veranschaulichen.

Man denke sich jedoch das Diagramm wie folgt:

Die Zahnstange auf Fig. 39 soll ein unendlich kleines Bruchstück eines langen Stromkreises vorstellen, der bis nach New-York und zurück reicht. Sie kann nach Belieben glatt oder gezahnt sein; um den Gedanken an eine materielle Uebertragung zu vermeiden,

denke man sie sich besser glatt. Nun erzeuge man an einem Punkt vermittelst einer Batterie, Dynamomaschine oder anderen elektrischen Vorrichtungen bei einigen Rädern diejenige Bewegung, die eintreten würde, wenn die Zahnstange sich vorwärtsbewegte. Sofort verbreitet sich die Bewegung durch die Zahnräder über das ganze Dielektricum und zwar mit einer Geschwindigkeit, die wir vorläufig als unendlich betrachten wollen, die wir aber später als die Geschwindigkeit des Lichts erkennen werden. In einiger Entfernung vom Draht ist die Rotation schwach; in seiner unmittelbaren Nähe aber sind die entgegengesetzt rotirenden Zahnräder von einander getrennt und drehen sich daher sehr schnell. Mit ausserordentlicher Geschwindigkeit schiesst die wirbelartige Bewegung dicht am Draht entlang; in seiner ganzen Ausdehnung ist er von Wirbelringen umgeben, wie auf Fig. 30B, und indem man einen Theil dieses Wirbels an der entfernten Station auf einen kleinen Raum zusammendrängt, erzielt man eine sichtbare Wirkung oder ein Signal.

Dies ist der Zweck des Drahts; er giebt den Wirkungen, die das Dielektricum mittheilt, die Richtung. Er selbst überträgt nichts; die Isolirschicht ist es, welche die Energie vermittelt; aber er schreibt ihr die Bahn vor, indem er die entgegengesetzt rotirenden Zahnradsysteme von einander trennt.

Soviel von einem vollkommen leitenden Draht. Ein gewöhnlicher Draht verhält sich genau ebenso, nur dass

die Räder an seiner Oberfläche nicht vollkommen frei gleiten können, sondern dass dabei gleichsam Reibung eintritt; dadurch geräth das in dem Draht enthaltene Zahnradsystem schichtenweise in Bewegung bis auf die Achse, die keine Störung erleidet. Die Uebertragung geschieht in derselben Weise wie bei einem vollkommenen Leiter, mit zwei Unterschieden. Erstens wird der Vorgang dadurch verzögert, dass die Räder in dem Metall erst in Gang kommen müssen, besonders wenn sie sehr massig sind, wie dies bei Eisen der Fall ist. Dieser erste Unterschied beruht darauf, dass der Leiter entweder sehr dick oder sehr magnetisch oder beides ist. Der zweite Unterschied besteht darin, dass die Reibung und Gleitung an der Oberfläche des unvollkommenen Leiters einen Theil der ursprünglich zugeführten Energie in Wärme umsetzt, dass er mithin weniger Energie überträgt als ein vollkommener Leiter. Man beachte jedoch, dass, obgleich der Draht die Energie ableitet, er sie keineswegs überträgt. Diejenige Energie, die auf ihn übergeht, ist verloren. Das Dielektricum allein überträgt sie mit Hülfe seines Zahnradgetriebes an entfernte Orte. (§§ 42—45.)

Wie wir später sehen werden, ist dieses Getriebe nicht starr, sondern elastisch, sodass die Uebertragung eine gewisse Zeit erfordert und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit endlich ist. Ja, ich kann sagen, wir haben uns schon davon überzeugt; wir haben ferner gesehen, dass einige Dielektrica weniger starr sind als

andere, z. B. Guttapercha weniger als Luft. (Siehe §§ 16 u. 23.) Diese übertragen daher die Störungen langsamer, aber stets, wie wir finden werden, nahezu mit Lichtgeschwindigkeit, soweit das Dielektricum allein in Betracht kommt. (§§ 133 u. ff.)

Einwirkung einer mechanischen Kraft auf einen strombefördernden Leiter

108. Auf Fig. 41 sahen wir den leitenden Theil eines Stromkreises nebst den dazugehörigen entgegengesetzten Rotationen auf beiden Seiten. Auf diese superponire man eine Wirbelbewegung, die sich durchweg in einer Richtung vollzieht, sodass die Rotation auf der einen Seite verstärkt, auf der anderen abgeschwächt wird; mit anderen Worten: man führe den Strom in ein magnetisches Feld ein. Alsdann überwiegt die Centrifugalkraft der Wirbel auf der einen Seite und drängt alle beweglichen Theile des Leiters aus den stärkeren in die schwächeren Theile des Feldes. Oder wenn keine beweglichen Theile vorhanden sind, so wird der Stromkreis wenigstens danach s t r e b e n sich auszudehnen, wenn die superponirte magnetische Wirbelbewegung mit der im Innern des Stromkreises bereits vorhandenen übereinstimmt; während er danach streben wird sich zu-

sammenzuziehen, wenn sie mit der ausserhalb vorhandenen gleichgerichtet ist.

Das durch einen Hin- und Rückstrom eingeschlossene Feld kann man in ähnlicher Weise darstellen, indem man die zu der einzelnen Leitung gehörigen Wirbel superponirt. (Siehe Fig. 40.) Auf diese Art entsteht zwischen den Drähten eine sehr starke Centrifugalkraft des Wirbels, während ausserhalb der Drähte fast garkeine Rotation stattfindet. Die Drähte werden also auseinandergedrängt; und darum strebt ein Stromkreis stets danach, einen möglichst grossen Raum einzuschliessen, sogar wenn kein anderes magnetisches Feld auf ihn einwirkt, als sein eigenes. Der auf Fig. 41 dargestellte Stromkreis z. B. strebt sich auszudehnen, auch ohne der Einwirkung eines magnetischen Feldes unterworfen zu sein, einfach weil die Wirbelbewegung inwendig stärker concentrirt und daher intensiver ist als aussen.

Wenn man ferner zwei Stromkreise mit entgegengesetzter Stromrichtung nebeneinander in dieselbe Ebene bringt, so hebt der eine die Einwirkung des anderen auf den zwischen ihnen liegenden Raum mehr oder weniger auf; sodass, wenn sie gleich stark sind, an dieser Stelle keine Wirbelbewegung stattfindet. Infolgedessen überwiegt die Centrifugalkraft auf der anderen Seite und drängt die Leiter zusammen; mit anderen Worten, gleichgerichtete Ströme ziehen einander an. Fig. 44.

109. Die Wirkung, welche die Einführung von

Eisen in den Stromkreis hervorruft, besteht nun darin, dass es in den Raum, den es ausfüllt, 100 bis 1000 mal soviel Wirbellinien hineinbringt, als zuvor darin waren, und dadurch begreiflicherweise sämmtliche Wirkungen gewaltig steigert, sowohl die mechanischen Kraftäusserungen wie die Aeusserungen des Beharrungsvermögens.

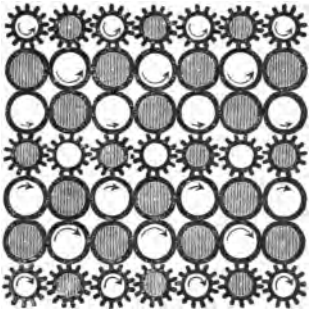


Fig. 44. — Zwei parallele Leiter, die gleich starke Ströme in der gleichen Richtung befördern, werden durch die Centrifugalkraft der äusseren Wirbel zusammengedrängt, da zwischen ihnen die Rotation aufgehoben ist. Die Länge der Pfeile bezeichnet wieder die Vertheilung des Magnetismus in den Leitern. Fig. 40 zeigt die entsprechende Abstossung zwischen entgegengesetzten Strömen.

Wenn ich sage, was ungefähr zutrifft, dass Eisen 1000 neue Linien in das Feld einführt, so bedeutet dies, dass auf einen einzigen anderweitig im Felde erregten Wirbel, im Eisen 1000 Wirbel eine übereinstimmende Richtung erhalten. Dieser Vorgang dauert fort, während das Feld zunimmt, bis fast alle im Eisen enthaltenen Wirbel in Anspruch genommen sind; ist

dieser Punkt erreicht, so nimmt das Verhältniss der Zunahme ab und man sagt, dass das Eisen Spuren von Sättigung zeigt. Käme es je dahin, dass sämmtliche Wirbel übereinstimmend gerichtet wären, so würde es vollständig gesättigt sein. Allein lange ehe dieser Zustand eintritt, macht sich eine andere Wirkung geltend, nämlich die Abschwächung der bereits gerichteten Wirbel durch die Einwirkung der starken magnetischen Induktion, welche die ganze Zeit bestrebt ist, die Molekularströme im Eisen nach Möglichkeit herabzumindern. Und so wäre der durch das Experiment bisher noch unerreichte Fall denkbar, dass das Eisen nicht nur aufhörte, das Feld zu verstärken, sondern sogar anfinge, es abzuschwächen; dass heisst seine Permeabilität könnte auf weniger als 1 heruntergehen, als wenn es eine diamagnetische Substanz wäre. (Vergl. § 81.)

Die einfachste Vorstellung von der Wirksamkeit des Eisens erhält man, wenn man sich seine Räder 100 bis 1000 mal massiger denkt als die der Luft, sodass ihr Beharrungsvermögen und ihre lebendige Kraft sehr gross sind. (Vergl. § 97.)

Dasjenige, was man gewöhnlich als magnetische Permeabilität bezeichnet und durch den Buchstaben μ ausdrückt (§ 82), kann in der That als eine Art Beharrungsvermögen aufgefasst werden; ein Beharrungsvermögen bezogen auf die Volumeneinheit; mit anderen Worten eine *Dichtigkeit* des Aethers; obschon man

nicht recht einsieht, wie es zugeht, dass der Aether im Innern von Eisen mit einem besonders grossen Beharrungsvermögen ausgestattet sein sollte. Möglich, dass sich die Eisenatome mit der Elektricität drehen (§ 94); möglich auch, dass der Grund ein ganz anderer ist. Worauf aber immer das eigenthümliche Verhalten von Eisen, Nickel u. s. w. zurückzuführen ist, seine Ursache wird von tiefgehendster Bedeutung sein, sobald wir durch eine nähere Kenntniss von dem molekularen Bau dieser Stoffe in die Lage versetzt sein werden, sie zu verstehen.

Induktion in Leitern, die keinen eigenen Strom befördern, sondern sich in einem magnetischen Felde bewegen

110. Das Entstehen inducirter Ströme in einem Leiter, der sich durch ein gleichförmiges magnetisches Feld bewegt, ist nicht ganz leicht zu erklären, weil keines der Diagramme sich dazu eignet, Stromkreise von wechselnder Gestalt und Grösse zu veranschaulichen.

Bringt man einen starren Leiter in ein magnetisches Feld, wie auf Fig. 45, und dreht ihn um 180° aus seiner Ebene, so liegt auf der Hand, dass ein Strom darin erregt werden wird; denn der Vorgang ist im Wesentlichen derselbe, als ob der Leiter fest bliebe und das Feld umgekehrt würde.

Es wird jedoch in einem geschlossenen Leitungskreis auch dann ein Strom erzeugt, wenn man nur ein einzelnes Leitstück bewegt, und dieses die Kraftlinien in der Weise schneidet, dass die Zahl der Kraftlinien im Stromkreis vergrössert wird. Dieser Strom entsteht dadurch, dass die inneren Wirbel sich ausdehnen, den Leiter wegzudrängen suchen und dabei Arbeit leisten,

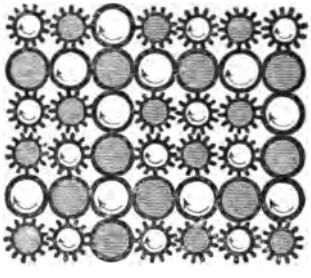


Fig. 45. — Querschnitt eines gleichförmigen magnetischen Feldes, mit zwei Schienen und einem verschiebbaren Verbindungsstück. Wenn das Verbindungsstück hin- und hergeschoben wird, werden die inneren Räder abwechselnd comprimirt und ausgedehnt. Dementsprechend gewinnen oder verlieren sie Energie und es entsteht jene Gleitung, die wir als inducirten Strom kennen gelernt haben.

während die äusseren Wirbel dieser Bewegung widerstreben, dadurch comprimirt werden und Energie aufspeichern. Die inneren Räder drehen sich daher etwas langsamer, weil sich der Stromkreis ausdehnt, während die Räder auf der anderen Seite des verschiebbaren Verbindungsstücks etwas schneller rotiren. Beide Vorgänge veranlassen das Räderwerk zu gleiten und zwar erst rings um die Innenseite und dann durch die ganze

Materie des Drahts, wodurch sich die positive Elektricität in der einen, die negative in der anderen Richtung um den Kreis vorwärtsbewegt. Auf diese Weise kann man sich die Entstehung des Stroms erklären. Man darf sich jedoch nicht vorstellen, dass eine endliche Erweiterung der Räder eintritt. Die Diffusion durch den Draht gleicht den Unterschied der Bewegung rasch aus, und neue Räder kommen um den Draht herum in den Kreis hinein; sobald daher der Leiter aufhört, sich zu bewegen, wird das Feld wieder constant; nur befinden sich jetzt viel mehr Räder innerhalb des Rahmens als zuvor.

Darstellung eines elektrostatischen Feldes und Superponirung auf ein senkrechtes magnetisches Feld

111. Eine elektrostatische Spannung wird bekanntlich verursacht durch gleich grosse entgegengesetzte Verrückungen der positiven und der negativen Elektricität längs der Kraftlinien. Fig. 7 A lieferte ein rohes Bild dieses Vorganges; nunmehr können wir ihn mit Hülfe unserer elastischen Zellen genauer darstellen. (Fig. 46.)

Hier sind die positiven Zellen in der einen, die negativen in der anderen Richtung verschoben. Wird die verrückende Kraft entfernt, so strebt das Mittel danach, in die Ruhelage zurückzuschnellen, und übt da-

bei einen Zug in der Richtung seiner Kraftlinien (der Richtung, in der es zuvor ausgedehnt wurde) und einen Druck in senkrechter Richtung zu ihnen (der Richtung, in der es sich dabei zusammenzog) aus.

Wenn nun sämmtliche Zellen mit parallelen Wirbeln erfüllt sind, wie bei dem Diagramm vorausgesetzt wurde, so ist es nicht unwahrscheinlich, dass diese elektrostatische Verrückung oder „abscheerende Wirkung" des Mittels einen gewissen Einfluss auf seine magnetischen Eigenschaften ausübt und dass, wenn die elektrostatische Spannung rasch umgekehrt wird, schwache magnetische Oscillationen auftreten werden; doch lassen sich diese Wechselwirkungen vorläufig noch nicht ins Einzelne verfolgen.

Disruptive Entladung

112. Die disruptive Entladung kann man sich in der Weise vorstellen, dass die schraffirten Zellen gewaltsam an einander vorbeigerissen werden, wobei das Mittel eine wirkliche Zerreissung, eine Art Elektrolyse, erleidet und die beiden Elektricitäten in entgegengesetzten Richtungen auf der Entladungsbahn an einander vorbeiwandern.

Man vergegenwärtige sich die Bewegung einer horizontalen Reihe schraffirter Zellen, wie auf Fig. 46, während eine solche Zerreissung des Mittels stattfindet.

Die Zellen gleiten nach rechts und hemmen im Gleiten die Rotation der oberen Reihe negativer Zellen, während die der unteren beschleunigt wird. Infolgedessen entsteht eine richtige magnetische Wirkung, genau wie diejenige, die einen Strom begleitet. Eine disruptive Entladung besitzt also sämmtliche Eigenschaften eines Stroms.

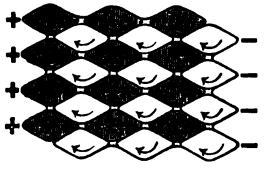


Fig. 46. — Theil eines elektrostatischen Feldes zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Körpern mit Kraftlinien in der Richtung von rechts nach links. Die Elasticität der Zellen (vielleicht zurückführbar auf das Rotiren einer Flüssigkeit in ihrem Innern, siehe § 156) veranlasst einen Zug längs und einen Druck senkrecht zur Richtung der Kraftlinien. Zugleich zeigt der Querschnitt magnetische Kraftlinien in senkrechter Richtung zum Bilde. Während dieses magnetische Feld erregt und von unten nach oben fortgepflanzt wurde, musste in den elastischen Zellen eine schwache Spannung entstehen, ähnlich wie die oben abgebildete, nur unendlich viel geringer im Verhältniss zu ihrem Normalzustand (Fig. 37). Umgekehrt wurden, während diese elektrostatische Spannung entstand, die positiven Wirbel etwas beschleunigt und die negativen gehemmt, wodurch eine sehr schwache magnetische Wirkung hervorgebracht wird. Wenn das Mittel nicht magnetisirt ist, fallen die Wirbel deshalb nicht fort, sie sind nur nicht übereinstimmend gerichtet.

Wirkungen einer fortbewegten Ladung

113. Diese Bewegung einer Reihe positiver oder negativer Zellen ist nahe verwandt mit der Fortbewegung einer Ladung durch ein dielektrisches Mittel.

Wenn ein geladener Körper mit grosser Geschwindigkeit vorwärtsbewegt wird, so versetzt er die ihm

zunächst liegenden Zellen in eine stärkere Rotation als die entfernteren und erzeugt auf diese Weise die einem magnetischen Felde eigenthümliche Wirbelbewegung. Mithin verhält sich eine fortbewegte Ladung genau wie ein Strom von einer gewissen Stärke.

Es mag sogar sein, dass dies die gewöhnliche Art ist, wie ein galvanischer Strom erregt wird; denn die chemischen Kräfte in einer Säule veranlassen die geladenen Atome, sich fortzubewegen, und erzeugen dadurch ein Feld, das, in der von Herrn Poynting geschilderten Weise sich ausbreitend (§ 42), in sämmtliche Theile des metallischen Stromkreises vordringt und darin den Strom erregt.

Elektrostatische Wirkungen eines beweglichen oder veränderlichen magnetischen Feldes

114. Ebenso wie ein bewegliches oder veränderliches elektrostatisches Feld schwache magnetische Wirkungen hervorbringen kann, so erzeugt auch ein bewegliches oder veränderliches magnetisches Feld eine Art elektrostatischer Spannung.

Denn ein zunehmendes Feld überträgt fortwährend die Rotation von einer Räderschicht auf die andere. Wenn die Räder gleiten, erhält man inducirte Ströme (Fig. 43); die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist verhältnissmässig gering, da der Vorgang mehr als eine Art von

Diffusion gedacht werden kann. Aber selbst wenn die Räder nicht gleiten, ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nicht unendlich, es sei denn, dass das Räderwerk vollkommen starr ist. In Wirklichkeit ist sie sehr gross, woraus hervorgeht, dass die Starrheit oder Elasticität der Räder im Verhältnis zu ihrer Trägheit sehr bedeutend ist, aber sie ist nicht unendlich. Die Ausbreitung der Rotation ist daher von einer vorübergehenden Spannung begleitet. Ein Theil des Feldes ist bereits von der Wirbelbewegung erfasst, während ein entfernterer Theil noch ruht; zwischen beiden entsteht eine Spannung, dass heisst das Räderwerk verschiebt sich etwas, während es in Bewegung versetzt wird. Auf diese Weise verursacht ein zunehmendes magnetisches Feld eine vorübergehende schwache elektrostatische Spannung im rechten Winkel zu der Richtung seiner Kraftlinien und zu der Richtung, in der es fortschreitet.

Erzeugung eines magnetischen Feldes. Induktion in geschlossenen Stromkreisen

115. Man denke sich ein unmagnetisirtes Stück Eisen; seine Wirbel sind sämmtlich vorhanden, aber sie sind in kleine geschlossene Kreise festgelegt und daher nicht äusserlich wirksam; magnetisirt man das Eisen, so erschliessen und erweitern sich einige dieser

Kreise, sodass ein Theil ihrer Bahn durch die Luft geht. Magnetisirt man es stärker, so erschliesst sich ein ganzes System von Kreisen zu Wirbelkernen, die, von Wirbeln umgeben, die gewöhnlichen magnetischen Kraftlinien bilden. Man braucht sich nicht einmal Eisen oder Stahl zu denken; auch in der Luft oder in jeder beliebigen anderen Substanz sind die Wirbel vorhanden, wenn auch viel schwächer und weniger zahlreich, und ihre Achsen bilden gewöhnlich kleine

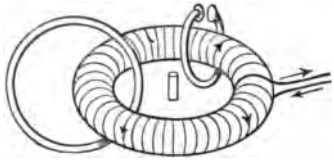


Fig. 47. — Geschlossener magnetischer Stromkreis, wie auf Fig. 42 mit einem geschlossenen und einem offenen sekundären Kreis; sowie mit einem in der Mitte aufgestellten, kurzen, stabförmigen Leiter.

geschlossene Kreise, vielleicht sogar innerhalb der einzelnen Atome. Man braucht nur einen strombefördernden Draht um sie zu wickeln, so erschliessen sie sich sofort zu den einem Stromkreis eigenthümlichen Kraftlinien.

Nun denke man sich wieder einen eisernen Ring oder ein kranzförmiges Drahtbündel, umwickle es mehrfach mit Kupferdraht (Fig. 47) wie eine Abtheilung eines Gramme'schen Ringes und sende einen Strom hindurch. Sofort erschliessen sich die im Eisen festgelegten Wirbel, schiessen hervor, durchmessen den

von dem Ring eingeschlossenen Luftraum (natürlich ohne sich auf eine Ebene zu beschränken) und treten auf der entgegengesetzten Seite wieder in den Ring ein; sodass, sobald der Strom constant geworden ist, sämmtliche Kraftlinien wieder im Innern des Eisens festgelegt sind, mit dem Unterschiede, dass sie jetzt einen Raum von der Grösse des Ringes umschliessen, statt unendlich kleine Ringe zu bilden. In gewissem Sinne ist also das Eisen noch immer unmagnetisirt, denn seine Kraftlinien bilden geschlossene Kurven in seinem Innern und ragen nirgends in die Luft hinaus. In einem anderen Sinne hingegen ist es so stark und nachhaltig in sich selbst magnetisirt, dass der Magnetismus nicht leicht wieder daraus vertrieben werden kann, ausser durch zweckmässige Anwendung umgekehrter Ströme.

Es bildet sich nunmehr ein einziger grosser elektrischer Wirbelring statt einer ungeordneten Anhäufung mikroskopischer Kreise. Sein Querschnitt ist auf Fig. 42 abgebildet. (Siehe auch Anhang [d] und [n].)

Während der veränderlichen Periode, das heisst während der Strom zunimmt oder umgekehrt wird, ist der von dem Ring eingeschlossene Raum sowie seine ganze Umgebung erfüllt von Myriaden sich erschliessender Kraftlinien, die im rechten Winkel zu ihrer Richtung von einer Seite des Eisens nach der anderen herüberschiessen und dort aufhören. Diese sich bewegenden Kraftlinien, die als kleine Wirbelringe nur

einen „einfach zusammenhängenden“ Flächenraum im Eisen einschlossen, nun aber in den „zweifach zusammenhängenden“ Raum des ganzen Eisenringes übergehen, oder umgekehrt, erzeugen gerade während dieses Ueberganges die starken inducirten Ströme in „sekundären Generatoren“.

In der That haben wir bei jeder Veränderung eines magnetischen Feldes überhaupt Kraftlinien, die sich senkrecht zu ihrer Richtung bewegen, ihre Wirbelbewegung ausbreiten und das Mittel, durch das sie sich bewegen, mehr oder weniger stören.

Sodann betrachte man einen sich fortbewegenden oder rotirenden Magneten. Seine Linien wandern mit ihm zusammen und da sie geschlossene Kurven bilden, müssen sie sich, wie oben, senkrecht zu ihrer Richtung durch das Feld bewegen, sodass auch hier genau dieselbe Wirkung eintreten wird, wie bei einem veränderlichen magnetischen Feld.

Wenn eine senkrecht zu ihrer Richtung sich fortbewegende Kraftlinie einen Leiter schneidet, so hemmt dies ihre Bewegung, denn ihre Räder gleiten an ihm und können nur allmählich den Wirbel in das Innere des mit gleitendem Räderwerk erfüllten Leiters übertragen; dabei entsteht, wie wir wissen, ein inducirter Strom. (Siehe § 103.)

Verschlingt man einen leitenden Ring mit dem oben geschilderten Eisenring, ähnlich wie ein Karabinerhaken mit einer Oese verschlungen wird, so muss

jeder Wirbel, der sich erschliesst, während der Ring magnetisirt wird, den leitenden Ring einmal schneiden, einerlei von welcher Gestalt und Grösse er ist. Die elektromotorische Kraft der Induktion ist daher in diesem Falle vollkommen definirt; sie ist einfach proportional der Zahl von Windungen, mit denen der sekundäre Leiter den Kern des Ringes umgiebt. (Fig. 47.)

Statt des geschlossenen sekundären Leiters denke man sich einen offenen: alsdann befindet sich noch immer eine elektromotorische Kraft darin, aber eine etwas schwächere, weil einige der sich erschliessenden Kraftlinien durch die Lücke hinausschiessen und keine Wirkung hervorbringen. Die Elektricität muss also, während der Ring magnetisirt und entmagnetirt wird, hin und her wallen, wie Wasser in einem auf und abschwankenden Trog und ein kleiner, mit den beiden freien Enden verbundener Kondensator wird abwechselnd geladen und entladen werden. Man könnte sich die Lücke so gross denken, dass nichts übrig bliebe, als ein kurzer Stab (Fig. 47); auch in diesem würden ähnliche elektrische Oscillationen auftreten.

Nun aber denke man sich überhaupt keinen sekundären Ring, sondern nur das von dem Ring eingeschlossene Dielektricum. In diesem muss jedesmal eine elektrische Verrückung stattfinden, wenn der Magnetismus umgekehrt wird. Sie kann oscillatorisch sein, aber sie wird sich im Ganzen in einer Richtung vollziehen, während der Magnetismus zunimmt,

und in der entgegengesetzten Richtung, während er abnimmt. An einem geladenen, in der Mitte des Ringes frei aufgehängten Körper kann die Einwirkung dieser magnetisch hervorgerufenen, ausserordentlich schwachen elektrostatischen Spannung wahrgenommen werden.[1])

116. Um uns klar zu machen, auf welche *Art* eine elektrostatische Verrückung in dem von dem Ringe eingeschlossenen Raum entsteht, brauchen wir nur einen Blick auf Fig. 42 zu werfen und die Reihe von Rädern auf der Linie A B zu betrachten, welche die beiden Hälften des Querschnitts von einander trennt. Diese Räder können nicht konstant in derselben Richtung rotiren, weil sie von beiden Seiten in entgegengesetzten Richtungen mitgenommen werden; mit anderen Worten, in der Nähe eines solchen Ringes giebt es, wie wir wissen, kein magnetisches Feld; nichtsdestoweniger aber wird bei Veränderungen des Magnetismus, wenn die Geschwindigkeit der inneren Wirbel wechselt, die Reibung am Dielektricum, die nöthig ist, um die äusseren Räder des Leiters aufzuhalten, entweder vermehrt oder vermindert. Da nun, wie wir gesehen haben (§ 111), die Räder eine gewisse Elasticität besitzen, so wird durch dieselbe während der veränderlichen Stadien des Magnetismus die elektrostatische Spannung im Felde verändert.

[1]) Ueber den experimentellen Nachweis dieser Wirkungen siehe Phil. Mag. Juni 1889.

THEIL IV

STRAHLUNG

KAPITEL XII

BEZIEHUNGEN DES AETHERS ZUR ELEKTRICITÄT

117. Soweit wir im Stande gewesen sind, die elektrischen Erscheinungen zu verstehen und zu erklären, geschah dies durch die Annahme eines Mittels mit gewissen mechanischen und quasi-mechanischen Eigenschaften, wie Beweglichkeit (§ 12), Inkompressibilität oder unendliche Elasticität des Volumens (§ 5), verbunden mit einem gewissen Grade von Plasticität oder endlicher Elasticität der Gestalt (§ 9). Wir dachten uns das Mittel ferner als aus zwei entgegengesetzten Bestandtheilen zusammengesetzt, die wir positive und negative Elektricität nannten (§ 90), und die derart mit einander verbunden waren, dass sie sich immer genau entgegengesetzt verhielten. Wir sahen uns sodann veranlasst, diese Bestandtheile mit einem gewissen Grade von Beharrungsvermögen auszustatten (§§ 38 u. 88) und wir erkannten in den Beziehungen der einzelnen Be-

standtheile zur Materie etwas der Reibung Aehnliches (§§ 28 u. 63).

Im Ganzen genommen können wir folgende Sätze aufstellen:

(1) Die *Reibung* macht sich geltend bei der Betrachtung von strömender Elektricität oder den Eigenschaften von Leitern. Ihre Gesetze sind kurz zusammengefasst in dem nach Ohm benannten Satz, dass ein Strom, der durch einen gegebenen Leiter fliesst, proportional der elektromotorischen Kraft ist, die ihn aussendet, oder dass die Gegenkraft, die ein Leiter einem Strom entgegensetzt, proportional der Stromstärke ist.

(2) Die *Elasticität* erweist sich als unentbehrlich um die elektrostatischen Erscheinungen, die Eigenschaften von Isolatoren, die elektrische Verrückung und das Zurückschnellen derselben oder Ladung und Entladung zu erklären. Ihre Gesetze wurden durch Faraday erforscht, und die relative Schmiegsamkeit (oder Abscherbarkeit, falls dieser Ausdruck für die Reciproke der Starrheit oder die Elasticität der Form gestattet ist) des Mittels in verschiedenen Stoffen wird auf die Luft als Einheit bezogen und als ihre specifische Induktionskapacität K bezeichnet.

(3) Das *Beharrungsvermögen* ergiebt sich aus den magnetischen Erscheinungen, mit deren Erforschung sich wohl hauptsächlich Thomson beschäftigt hat; er nannte die relative Dichtigkeit des Mittels in verschiedenen Stoffen ihre magnetische Permeabilität oder

magnetische induktive Kapacität; das Verhältniss ihres Werthes für irgend eine Substanz zu ihrem Werth für gewöhnliche Luft wird mit μ bezeichnet.

(4) Die *doppelte Beschaffenheit* des Mittels oder seine Zusammensetzung aus zwei einander genau entgegengesetzten Elementen wird nahegelegt durch die Erscheinungen der Elektrolyse, das Fehlen einer mechanischen Beharrung in Strömen und Magneten und die Schwierigkeit, ein Mittel zu denken, das zugleich starr und doch für die sich hindurchbewegende Materie vollständig flüssig ist.

118. Mit der Hypothese der doppelten Beschaffenheit fällt die letztgenannte Schwierigkeit fort. Der Aether kann als Ganzes vollständig flüssig sein und Körper ohne Widerstand hindurchlassen, während seine beiden Bestandtheile elastisch mit einander verbunden sind und jeder Kraft, die sie zu trennen strebt, widerstehen, wie ein fester Körper widerstehen würde, wenn er hinreichende Starrheit besitzt. Der Unterschied ist derselbe, wie der, ob man seine Hand durchs Wasser zieht oder es chemisch zersetzt; ob man ein Stück Leinewand hin- und herbewegt, oder es in seine einzelnen Fäden zerreisst.

Um die Sache kurz und klar zu fassen: Die Begriffe Materie und Aether nebst ihren wechselseitigen Beziehungen sind uns geläufig und wir wissen, dass obgleich ein Theil des Aethers sich frei durch die Materie zu bewegen scheint, ein anderer Theil sich scheinbar

mit der Materie bewegt, als ob er mit ihr zusammenhinge. Diese Anschauungsweise rührt bereits von Fresnel her (§ 184). Wir gehen nun einen Schritt weiter und zerlegen den Aether in zwei gleiche entgegengesetzte Bestandtheile, die Beharrungsvermögen besitzen und durch ein elastisches Band verbunden sind — ein Band, das durch die Gegenwart von Materie im Allgemeinen gelockert und unter Umständen aufgelöst wird. Wir nennen die beiden Bestandtheile positive und negative Elektricität und denken uns den Aether als aus diesen beiden Elektricitäten zusammengesetzt. In Metallen löst sich das Band zwischen beiden, in gewöhnlichen Isolatoren lockert es sich oder wird weniger starr. Die specifische Induktionskapacität eines Stoffes bedeutet die Reciproke der Starrheit seines doppelt zusammengesetzten Aethers. Wenn wir diese Starrheit k nennen, so ist $k = \frac{1}{K}$.

Die Nachbarschaft von Materie scheint dem Aether auch grössere *Dichtigkeit* zu verleihen. Zwar kann man sich schwer vorstellen, dass sie ein inkompressibles Fluidum wirklich verdichtet, aber sie kann es so beschweren oder anderweitig modificiren, dass sie den *Schein* grösserer Dichtigkeit hervorruft. Im Eisen erreicht diese Dichtigkeit ihren höchsten bekannten Grad. Für alle Stoffe wollen wir die Dichtigkeit oder das Beharrungsvermögen ihres Aethers im Verhältniss zur

Volumeneinheit durch μ ausdrücken und als ihre magnetische Permeabilität bezeichnen.[1])

119. Wir wollen uns darüber Rechenschaft geben, was wir vorhaben. Im I. Theil beschäftigten wir uns mit Wirkungen, die ungefähr denjenigen entsprachen, welche ein elastisches inkompressibles Mittel (ungefähr wie Gummi oder Gallerte) hervorbringen würde; das heisst wir gelangten zu dem Postulat eines Mittels, das Elasticität oder eine analoge Eigenschaft besass. Im II. und III. Theil beschäftigten wir uns mit Wirkungen, die es mehr oder weniger nothwendig erscheinen liessen, dem Mittel eine dem Beharrungsvermögen ähnliche Eigenschaft zu verleihen; wir sahen uns ferner genöthigt, eine doppelte Beschaffenheit des Mittels anzunehmen, damit abscherende Spannungen darin stattfinden könnten, während es als Ganzes doch vollkommen flüssig blieb. Diese unbestimmten Analogien und Vorstellungen sollen nun klarer und schärfer umrissen werden. Wir kennen bereits eine kontinuirliche, inkompressible Flüssigkeit, die den ganzen Raum erfüllt und die wir Aether nennen. Diese soll aus zwei Bestandtheilen bestehen und durch eine elektromotorische Kraft wieder in dieselben zerlegbar sein. Wir lassen diese Bestandtheile mit einer gewissen Zähigkeit an einander festhalten, sodass das Mittel eine elektromotorische Elasticität besitzt, obgleich es mecha-

[1]) Streng genommen beträgt die Dichtigkeit wahrscheinlich $4\pi\mu$ und die Starrheit $4\pi/K$; die 4π sind jedoch der Einfachheit halber weggelassen.

nisch vollkommen flüssig ist; und wir verleihen jedem Bestandtheil Beharrungsvermögen oder eine dem Beharrungsvermögen so ähnliche Eigenschaft, dass sie gleiche Wirkungen hervorbringt.

Mit dieser Hypothese lassen sich die elektrischen Erscheinungen bis zu einem gewissen Grade erklären. Allerdings ist die Erklärung nicht erschöpfend; wie sich denn überhaupt die wenigsten Dinge erschöpfend erklären lassen. Sie ist nicht einmal so vollständig, wie man wünschen könnte, denn das Wesen des Zusammenhanges zwischen den Bestandtheilen des Aethers, sowie zwischen dem Aether und der Materie — das Wesen der Kraft und des Beharrungsvermögens heisst das — bleibt von der Hypothese unberührt. Diese Beschränkung muss offen zugestanden werden. Wäre sie aber die einzige, träfe sonst alles an unserer Hypothese zu, dann wären wir um einen guten Schritt weiter. Es ist kaum zu hoffen, dass dem so ist; kaum zu erwarten, dass die oben ausgesprochene Thatsache mehr ist als eine blosse Parodie der Wirklichkeit. Aber selbst angenommen, dass eine klarere Vorstellung, eine angemessene Fassung dessen möglich wäre, was wir elektromotorische Elasticität und Beharrungsvermögen nennen (§ 156), so sind wir doch verpflichtet, die Hypothese auch auf andere Gebiete zu verfolgen, wenn wir an diesen Begriffen wirkliche Analogien haben, und wenn sich herausstellt, dass ein derartig beschaffenes Mittel sich durchaus elektrisch verhält und in Verbin-

dung mit der Materie sämmtliche bekannte elektrische Erscheinungen hervorzurufen im Stande ist. Wir müssen ferner feststellen, ob nicht andere dunkle Erscheinungen, die gewöhnlich nicht als elektrisch gelten, in das Bereich dieser hypothetischen Substanz gehören und durch sie erklärt werden können (§ 8). Dies zu unternehmen, soll jetzt unsere Aufgabe sein.

120. Ehe wir jedoch daran gehen, möchte ich feststellen, was ich unter „elektromotorischer Elasticität" verstehe. Man könnte sie auch chemische oder molekulare Elasticität nennen. Es besteht eine wohlbekannte Unterscheidung zwischen elektromotorischer und gewöhnlicher stoffbewegender Kraft. Die eine wirkt auf die Elektricität ein, indem sie sie spannt oder bewegt, oder im Allgemeinen „verschiebt"; die andere wirkt in derselben Weise auf die Materie. Das eigentliche Wesen dieser Kräfte kann nicht als bekannt angesehen werden; wir können aber ungefähr sagen: wie sich die Elektricität zur Materie verhält, so verhält sich die elektrische Kraft zur gewöhnlichen mechanischen Kraft; so verhält sich die elektrische Elasticität zur gewöhnlichen Elasticität oder Starrheit fester Körper; so vielleicht auch das elektrische Beharrungsvermögen zum gewöhnlichen Beharrungsvermögen.

Das Beharrungsvermögen definirt man als das Verhältniss der Kraft zur Beschleunigung; ebenso kann man das elektrische Beharrungsvermögen nach dem Verhältniss der elektromotorischen Kraft zu der erzeugten

Beschleunigung der elektrischen Verrückung bestimmen. Es wäre sehr wohl möglich, dass elektrisches Beharrungsvermögen und gewöhnliches Beharrungsvermögen dasselbe wären, ebenso wie elektrische Energie und mechanische Energie identisch sind. Träfe dies zu, so wären wir einer mechanischen Erklärung um einen Schritt näher gerückt; allerdings ist es weder nothwendig noch erwiesen, aber wie dem auch sei, unsere Analogie hält unzweifelhaft Stich und kann mit Vortheil ausgestaltet werden.

Benutzen wir nun diesen Begriff „elektromotorische Elasticität", so können wir sagen, dass reines Wasser oder Gas zwar mechanisch dnrchlässig aber elektromotorisch elastisch sind; beide widerstehen elektrischen Kräften bis zu einem gewissen Grade; darüber hinaus zerreissen sie; wird die elektromotorische Kraft entfernt, so kehren sie in ihren ursprünglichen Zustand zurück. Glas verhält sich in derselben Weise, mit dem Unterschiede, dass es gleichzeitig auch mechanisch elastisch ist. Seine mechanische Elasticität und Festigkeit haben jedoch mit seiner elektrischen Elasticität und Festigkeit nichts zu thun.

Es ist im Allgemeinen leicht verständlich, weshalb Flüssigkeiten elektrische, chemische, oder molekulare Elasticität besitzen können. Ihre Molekeln sind aus zwei oder mehreren Atomen zusammengesetzt, die mit grosser Zähigkeit an einander festhalten, während die einzelnen Molekeln unabhängig von einander sind.

Mechanische Kräfte wirken auf die Molekeln als Ganzes; ihnen gegenüber ist die Substanz also flüssig. Elektrische oder chemische Kräfte dagegen wirken auf die einzelnen Bestandtheile der Molekel, erzeugen zwischen ihnen eine abscherende Spannung und suchen sie auseinanderzureissen. Solchen Kräften gegenüber besitzt die Flüssigkeit daher eine gewisse Elasticität oder Dichtigkeit. Ueberträgt man diese Anschauungsweise auf den Aufbau des Aethers, so hat man wenigstens eine feste Grundlage, von der man ausgehen kann.

121. Vielleicht dürfte an dieser Stelle der Rath nicht unangebracht sein, die beiden ersten Theile im Lichte des oben Gesagten noch einmal durchzulesen, wobei man sich erinnern möge, dass wir anfangs, der Einfachheit halber, kurzweg ein elastisches Mittel annahmen, ohne seine Elasticität durch einen besonderen Mechanismus, d. h. durch die Zusammensetzung aus zwei Bestandtheilen, näher zu begründen. Daher die offenbare Künstlichkeit solcher Modelle wie des auf Figur 6 abgebildeten, bei dem feste Leisten den Gummibändern zur Befestigung dienen. Aber es ist ziemlich einleuchtend, dass man dem wirklichen Vorgang näher kommt, wenn man, wie schon auf Figur 7 a angedeutet wurde, zwei verschiedene Sorten von Kügelchen annimmt, die in abwechselnden parallelen Reihen aufgezogen, mit Gummibändern verbunden und gleichzeitig in entgegengesetzten Richtungen verschoben werden. Eine noch weiter vorgeschrittene Analogie gewährt

Figur 46. Wir sind also allmählich aus der Theorie, die ein Fluidum annimmt, in eine Theorie übergegangen, die in modificirter Weise zwei Fluida voraussetzt, und glauben damit in gewissem Sinne der Wahrheit näher gekommen zu sein

Zurückschnellen des Mittels nach der Spannung

122. Man betrachte nunmehr das Verhalten eines Mittels von einer elastischen Starrheit k und einer Dichtigkeit μ, das Verrückungen oder Spannungen unterliegt. Wird die verrückende Kraft entfernt, so schnellt natürlich das Mittel in seine Ruhelage zurück, schiesst aber über das Ziel hinaus, prallt wieder zurück und oscillirt so lange, bis die ursprüngliche Energie durch Zähigkeit oder innere Reibung verbraucht ist. Wenn die Zähigkeit sehr gross ist, so kann das Mittel nicht oscilliren, sondern gleitet aperiodisch in die Ruhelage zurück, wozu es theoretisch einer unendlich langen Zeit bedarf, während es sie praktisch in ziemlich kurzer Zeit wenigstens annähernd erreicht. Die völlige Rückkehr vollzieht sich entweder rasch oder mit jedem beliebigen Grad von Langsamkeit, je nachdem die Zähigkeit sich zum Beharrungsvermögen und zur Elasticität des Mittels verhält (§ 19).

Die Frage gehört der reinen Mechanik an. Es handelt sich um eine harmonische Bewegung, modificirt

durch eine der Geschwindigkeit proportionale Reibung. Der elektrische Fall ist aus zwei Gründen einfacher als der mechanische: erstens, weil, solange die Kapacität konstant ist (und eine Veränderung wurde bisher noch nicht beobachtet) das Hooke'sche Gesetz unbedingt gilt, demzufolge die Gegenkraft proportional der Verrückung ist; zweitens, weil bei allen Leitern, die dem Ohm'schen Gesetz gehorchen (und kein echter Leiter entzieht sich diesem Gesetz) die Reibungskraft genau proportional der Geschwindigkeit ist.

123. Es giebt zwei oder man kann auch sagen drei Hauptfälle. Zunächst kann die Reibung sehr gross sein. In diesem Fall vollzieht sich die Rückkehr in die Ruhelage sehr allmählich, wie eine abnehmende geometrische Reihe oder eine logarithmische Kurve. Hierbei ist das logarithmische Decrement ganz unabhängig von dem Beharrungsvermögen und gleich dem Quotienten der Elasticitäts- und Widerstandscoefficienten.

Mit der Abnahme des Widerstandes vollzieht sich die Reaktion immer schneller, bis das Beharrungsvermögen anfängt sich geltend zu machen und die Dauer der Rückkehr wieder ausdehnt, indem es die zurückschnellende Materie über ihre Ruhelage hinausträgt und auf diese Weise die Störung durch Oscillationen verlängert. Am schnellsten vollzieht sich die Reaktion in dem Augenblick, ehe diese Oscillationen anfangen, und es lässt sich nachweisen, dass dieser Augenblick eintritt, wenn der

Widerstandscoefficient doppelt so viel beträgt als das geometrische Mittel der Elasticität und des Beharrungsvermögens. Wir wollen diesen Fall als den zweiten betrachten. Die Rückkehr ist alsdann vollkommen aperiodisch und vollzieht sich in einem Minimum von Zeit.

Der dritte Fall tritt ein, wenn der Widerstand sehr gering ist und die Rückkehr daher einen ausgesprochen oscillatorischen Charakter besitzt. Wäre die Zähigkeit wirklich gleich Null, so würde die Bewegung einfach harmonisch sein und unbegrenzt fortdauern, wenn nicht ein anderes Mittel vorgesehen wird, um die Energie aufzubrauchen. Ist dies jedoch der Fall, oder ist die Zähigkeit endlich, so sind die Schwingungen einfach harmonisch mit abnehmender Amplitude, wobei die Endpunkte der Ausschläge auf einer logarithmischen Kurve liegen.

In diesem Fall ist die Schwingungsdauer so gut wie unabhängig von der Reibung; sie hängt nur ab von der Elasticität und dem Beharrungsvermögen, und die Dauer einer einzigen ganzen Schwingung ist, wie für die einfach harmonische Bewegung, gleich der Quadratwurzel aus dem Verhältniss des Trägheitskoefficienten (m) und des Elasticitätskoefficienten (k), multiplizirt mit $2\,\pi$.

124. Will man dem Satz eine konkretere Fassung geben, so denke man sich einen Stromkreis, der ein gewisses Maass aufgespeicherter potentieller Energie oder

elektrischer Spannung enthält; z. B. eine geladene Leydener Flasche mit einem beinahe geschlossenen Entladungskreis. Der Elasticitätskoefficient ist hier der reciproke Werth von der Kapacität der Flasche; je mehr sie fasst, d. h. je „schmiegsamer" sie ist, um so geringer ist die elastische Reaktion auf eine gegebene Verrückung, so dass Kapacität das Umgekehrte von Starrheit bedeutet. Der Trägheitskoefficient ist die Grösse, welche man elektrisch als die „Selbstinduktion" des Stromkreises bezeichnet. Er umfasst das Beharrungsvermögen des gesammten verschobenen Stoffes und Aethers, d. h. aller Theile, welche bei der Entladung der Flasche bewegt oder gestört werden. Die Aufgabe, seine Grösse für einen gegebenen Fall zu berechnen, ist zwar keineswegs einfach, aber doch ausführbar, und der allgemeine Gedankengang bleibt auch dann noch verständlich, wenn man die genauen Funktionen jedes einzelnen Theils des umgebenden Mittels nicht kennt. (Siehe Anhang.)

Auf Grund der bekannten Formel für die Schwingungsdauer einer einfach harmonischen Bewegung

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

haben wir, wenn mit L die Selbstinduktion oder das Beharrungsvermögen des Stromkreises und mit S seine Kapacität oder umgekehrte Elasticitätskonstante bezeichnet wird

$$T = 2\pi \sqrt{LS}.$$

Dies ist also die Dauer einer ganzen Schwingung. Sobald die Flasche entladen wird, fangen die Oscillationen an und fahren fort wie die Schwingungen einer Stimmgabel, bis sie durch die Zähigkeit des Mittels oder andere Vorrichtungen zum Verbrauch der Energie vernichtet werden.

125. Wenn wir uns nun aber eine Stimmgabel denken, die überhaupt keine Zähigkeit besitzt, wird sie alsdann ins Unbegrenzte fortfahren zu schwingen? In einem Vacuum, ja; in der Luft nein, denn sie ist von einem Mittel umgeben, das ihre Schwingungen übernimmt und beliebig weit fortpflanzt. Ein schwingender Körper in einem geeigneten Mittel versetzt jenes in eine wellenförmige Bewegung und das Mittel überträgt die Wellen in den Raum hinaus oder auf absorbirende Hindernisse. Es wird also die Energie aus dem schwingenden Körper abgeleitet und sie tritt an dem Ort, wo die ausgestrahlten Wellen absorbirt werden, in anderer Gestalt wieder auf. (§ 141.)

Die Gesetze dieser Fortpflanzung sind bekannt. Ihre Geschwindigkeit ist unabhängig von den Eigenschaften des ursprünglich schwingenden Körpers, der eigentlichen Quelle der Störung, und beruht ausschliesslich auf der Beschaffenheit des Mittels. Sie ist genau gleich der Quadratwurzel aus dem Verhältniss seiner Elasticität zu seiner Dichtigkeit.

Aber obgleich sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit unabhängig von der Quelle bestimmen lässt, so

gilt dies nicht von der Länge der einzelnen Wellen. Diese hängt ab sowohl von der Geschwindigkeit, mit der sie sich bewegen, als von der Geschwindigkeit, mit der die Quelle schwingt. Es ist allgemein bekannt und leuchtet sofort ein, dass die Länge der einzelnen Wellen gleich ist dem Produkt einer Schwingungsdauer und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit.

126. Aber nicht jedes Mittel vermag jede Art von Schwingung fortzupflanzen. Die Schwingungen eines Körpers können ganz andere sein als die, welche das umgebende Mittel zu befördern im Stande ist. In diesem Fall kann eine Ableitung der Energie durch Wellen nicht stattfinden; es tritt keine Strahlung ein. Die einzige Strahlung, die gewöhnliche Fluida mechanisch fortpflanzen können, ist, wie allgemein bekannt, diejenige, die als Schall an unser Ohr dringt. Die Elasticität, um die es sich bei dieser Störung handelt, ist blosse Volumenelasticität oder Inkompressibität. Aber die elektrischen Versuche (von Cavendish §§ 4 und 14a und Faraday § 4) beweisen, dass der Aether eine ganz enorme, vielleicht eine absolute Inkompressibilität besitzt; und ist dies der Fall, so würden derartige Schwingungen mit unendlicher Geschwindigkeit fortgepflanzt werden und keine eigentlichen Wellen erregen.

Es ist denkbar (ich möchte sagen wahrscheinlich), dass die *Gravitation* durch solche longitudinale Impulse oder Stösse fortgepflanzt wird. Alsdann braucht sie

fast keine oder gar keine Zeit; wäre ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit endlich, so könnte sie bestimmt werden, indem man Cavendish's Versuch (den *elektrischen*, nicht die gewöhnliche Bestimmung der Gravifationskonstante) mit noch grösserer Präcision wiederholt, als bisher geschehen ist; aber eine echte durch den Aether fortgepflanzte Strahlung kann nicht longitudinaler Art sein. Die Elasticität des Aethers besitzt denselben Charakter wie seine Starrheit. Der Aether ist nur Abscherungen und Verrückungen unterworfen; nicht mechanischem Druck (diesem gegenüber ist er vollständig durchlässig und widerstandslos), sondern elektromotorischem Druck; er besitzt eine elektrische Starrheit und diese ist es, welche die Fortpflanzung der Wellenbewegung besorgt.

Die oscillatorische Entladung der Leydener Flasche ist nun gerade geeignet, dem Aether elektromotorische Schwingungen zu ertheilen, ihn in der Weise zu erschüttern, dass er im Stande ist, sie fortzupflanzen; von einem sich entladenden Stromkreis werden also Wellen von elektrischer Verrückung oder transversale Wellen nach allen Richtungen ausgehen und sich mit einer Geschwindigkeit verbreiten, die von der Beschaffenheit des Mittels abhängt.

Demnach würde also, sogar bei einem vollkommen leitenden Stromkreis, die Fortdauer der Entladung beschränkt sein; die Energie würde verbraucht werden, nicht durch Reibung, denn in einem solchen Stromkreis

würde keine direkte Wärmeerzeugung stattfinden, sondern durch Strahlung, ähnlich wie bei einem warmen Körper, der sich abkühlt, oder einer schwingenden Stimmgabel mit Resonanzboden. Die Energie des schwingenden Körpers würde allmählich auf das Mittel übergehen und durch dasselbe weiter befördert werden; wohin, das würde sodann lediglich von der Beschaffenheit und Lage der materiellen Hindernisse abhängen, denen sie begegnet. (Siehe § 160; sowie weiter unten die Vorlesung über die Entladung einer Leydener Flasche.)

KAPITEL XIII

KONSTANTEN DES AETHERS

Geschwindigkeit der elektrischen Strahlung

127. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen beruht, wie gesagt, ausschliesslich auf der Beschaffenheit des Mittels, auf dem Verhältniss seiner Elasticität zu seiner Dichtigkeit. Die Elasticität muss von der Art sein, die bei den Schwingungen betheiligt ist; da jedoch in diesem Fall die Schwingungen elektrisch sind, so ist gerade elektrische Elasticität diejenige Art, auf die es hier ankommt. Diese Art von Elasticität ist die einzige von endlichem Werthe, die der Aether besitzt. Ihre Grösse ist durch elektrostatische Versuche indirekt, aber leider nicht absolut messbar; nur die relative Elasticität des durch die Nähe grober Materie modificirten Aethers ist bisher gemessen worden; ihren reciproken Werth nennt man die specifische Induktionskapacität oder Dielektricitätskonstante K. Der absolute

Werth der Grösse K ist vorläufig noch unbekannt; man ist daher übereingekommen ihn für Luft gleich 1 zu setzen. Diese Konvention bildet die Grundlage des künstlichen elektrostatischen Maassystems. Kein Mensch nimmt an, oder kein Mensch ist berechtigt anzunehmen, dass ihr Werth wirklich 1 beträgt. Der bisher einzige rationelle Versuch, die Starrheit des Aethers wirklich zu berechnen, geht von Sir W. Thomson [1]) aus. Setzen wir sie gleich $4\pi/K$, so beträgt nach ihm der Werth von K für Luft wahrscheinlich ungefähr 140. Aber einerlei ob wir ihn kennen oder nicht (und gegenwärtig ist er jedenfalls noch unbekannt), der absolute Werth der Dielektricitätskonstante ist ein berechtigtes Problem, das alle Tage gelöst werden kann.

Der zweite Umstand, von dem die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen abhängt, ist die Dichtigkeit des Mittels, oder, um sie näher zu bezeichnen, seine elektrische Dichtigkeit. Auch den absoluten Werth dieser Grösse kennen wir nicht. Ihr relativer oder scheinbarer Werth innerhalb verschiedener Stoffe ist durch magnetische Versuche messbar, heisst ihre specifische magnetische Kapacität oder Permeabilität und wird mit μ bezeichnet.

Da man sie nicht kennt, hat man sich auch hier,

[1]) Verh. der R. S. Edinb. XXI, 60; siehe auch Artikel „Aether" in der Encyc. Brit., und die Schlusszeile des III. Bandes der „Mathematical and Physical Papers".

ganz unabhängig von der oben erwähnten Konvention, entschlossen, ihren Werth für Luft mit 1 zu bezeichnen. Auf diese Annahme gründet sich das künstliche elektromagnetische Maassystem, die Begriffe Volt, Ohm, Ampère, Farad u. s. w. Beide Konventionen sind offenbar falsch; niemand ist im Geringsten berechtigt, sie für richtig zu halten. Der einzige Versuch, die absolute Dichtigkeit des Aethers zu berechnen, stammt von Sir William Thomson und basirt auf der oben angeführten Schätzung von der Starrheit des Aethers. Auf Grund der hier vorgetragenen Ansichten würde danach der Werth von μ für die Luft 8×10^{-24} betragen.

128. Nachdem nun mit Bestimmtheit festgestellt worden ist, dass die beiden grossen Konstanten des Aethers k oder $\frac{1}{K}$ und μ zwar gegenwärtig noch unbekannt sind, sich jedoch keineswegs unserer Erkenntniss entziehen und jederzeit bekannt werden können, sobald eine geeignete Versuchsmethode ersonnen sein wird, bleibt uns noch übrig, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen darin auszudrücken. Diese Geschwindigkeit ist bekanntlich einfach die Quadratwurzel des Verhältnisses der Elasticität zur Dichtigkeit, also:

$$v = \sqrt{\frac{k}{\mu}}, \text{ oder } \frac{1}{\sqrt{(K\mu)}}.$$

Mit dieser Geschwindigkeit verlassen also die Wellen den sich entladenden Stromkreis einer Leydener Flasche

oder irgend eines anderen Leiters, der wechselnde oder veränderliche Ströme befördert, und wandern in den Raum hinaus.

Da wir weder k noch μ kennen, so können wir diese Geschwindigkeit nicht direkt berechnen, wohl aber können wir versuchen, sie experimentell zu bestimmen.

129. Die erste roheste Art, diesen Versuch auszuführen, würde darin bestehen, in die Nähe eines oscillirenden, primären Stromkreises einen sekundären zu bringen und festzustellen, wie schnell die Störung ihn erreicht. Man könnte z. B. eine beinahe geschlossene Drahtschleife in gegebener Entfernung gegenüber einer Leydener Flasche aufstellen und vermittelst eines rotirenden Spiegels oder auf eine beliebige andere Art die Zeit abmessen, die zwischen dem Eintritt eines Funkens der primären Entladung und dem Ueberspringen inducirter Funken im sekundären Stromkreise verstreicht. Auf diese Art würde sich jedoch kaum irgend eine Zeitdifferenz wahrnehmen lassen, da die Fortpflanzung zu rasch vor sich geht.

130. Seit Obiges geschrieben wurde, ist es Heinrich Hertz in Karlsruhe gelungen, mit Hülfe eben dieser Methode die Geschwindigkeit zu messen. Er mass allerdings weder die Zeit, die zwischen dem Schliessen des primären Stromkreises und dem Entstehen des inducirten Stroms im sekundären Leiter verstrich, noch bediente er sich einer Leydener Flasche, sondern er

erregte vermittelst einer Induktionsspule elektrische Oscillationen und verwandelte die von diesen ausgehenden fortschreitenden Wellen in stehende Wellen, indem er sie von einer ebenen metallischen Wand reflektirte. Nun kann man Wellen, die an einem gestreckten Seil entlangwandern, durch die Interferenz direkter und reflektirter Stösse in stehende Wellen mit Schwingungsknoten und Bäuchen verwandelten, wobei die Reflexion von dem festen Ende des Seils ausgeht. Genau ebenso liess Hertz die Wellen, die von einem elektrostatischen Oscillator oder einem geladenen, mit den Polen einer Induktionsspule verbundenen Körper ausgingen, von der Zimmerwand (die mit Zinkblech belegt war, um daraus einen Leiter und somit einen guten Reflektor zu machen, siehe § 164) reflektiren und verwandelte sie durch Interferenz mit den direkten Wellen in stehende Wellen mit Schwingungsknoten und Bäuchen, wobei der Zwischenraum zwischen zwei Knoten eine halbe Wellenlänge betrug.

Indem er nun den sekundären Stromkreis zwischen dem primären Leiter und der Wand umher bewegte, fand er Punkte von maximaler und minimaler Störung und mass auf diese Weise die Wellenlänge. Dann berechnete er die Schwingungsdauer des primären Stromkreises (oder partiellen Stromkreises, denn er war nicht geschlossen) und erhielt so das indirekte Mass der Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Soweit man urtheilen kann,

deckt es sich mit den Resultaten anderer Messungsmethoden, auf die wir nunmehr eingehen wollen.

131. Man könnte zunächst das Princip des Telegraphen verwerthen, d. h. die Fortpflanzung einer Störung, die von einem beliebigen Punkt ausgeht, längs eines einfachen Leitungskreises. Man denke sich einen grossen geschlossenen Drahtkreis mit oder ohne Strom und erzeuge an irgend einem Punkt eine plötzliche Störung, sei es durch eine plötzlich eingeführte elektromotorische Kraft, oder, wenn bereits ein Strom vorhanden ist, durch einen plötzlichen Widerstand. Dann wird sich die Störung von jenem Punkt aus durch den Aether ausbreiten, genau wie die Erschütterung nach einem Schlag oder einer Explosion von Schiessbaumwolle durch die Luft. Eine regelmässige Reihenfolge von Störungen würde den Aether in wellenförmige Bewegung versetzen, während eine einzelne Störung nur einen Stoss oder eine Erschütterung hervorbringt; aber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist in beiden Fällen gleich, und wir dürfen die Ankunft der Erschütterung an einer entfernten Station erwarten. Da die Station weit fort verlegt werden muss, damit die Zeit messbar wird, so braucht man gleichsam ein Sprachrohr, um die gleichmässige Ausbreitung nach allen Seiten einzuschränken und die Störung in der Richtung nach dem gewünschten Ort hin zu koncentriren. Was das Sprachrohr für den Schall, das ist der

Draht des Stromkreises, der Telegraphendraht, für die Aetherwellen.

Diese Funktion des Telegraphendrahtes ist eigenthümlich; er *befördert* nicht die Stösse, er gibt ihnen nur die Richtung. Befördert werden sie ausschliesslich durch den Aether und zwar mit einer Geschwindigkeit, die von dessen Eigenschaften abhängt, so modificirt er auch durch die Nähe grober Materie sein mag. Jede Störung, die der Draht aufnimmt, wird sofort in Wärme umgesetzt und geht nicht weiter; das isolirende Mittel, das ihn umgiebt, überträgt allein die Stösse auf die entfernte Station.

Alles dies wurde bereits im III. Theil erörtert und zugleich der Versuch gemacht, die Mechanik des Vorganges zu erklären sowie durch Analogien zu erläutern. (Cap. XI).

Der wesentliche Punkt ist der, dass Ströme nicht durch einen vom Ende aus wirkenden Stoss fortbewegt werden, wie Wasser in einer Röhre oder Luft in einem Sprachrohr, sondern durch seitlich angreifende Kräfte, z. B. durch eine Reihe rotirender Räder mit senkrecht zum Draht gerichteten Axen, die den Draht als Kern umschliessen und mit mehr oder weniger Reibung an ihm gleiten. Dieser Umstand ist bezeichnend für den Aether überhaupt. Der Aether befördert keine Longitudinalwellen oder in Richtung der Fortpflanzung wirkenden Stösse, wie Schall, sondern Transversal-

schwingungen, die durch seitliche Anstösse erregt werden, wie Licht. (§ 42.)

132. Ohne uns weiter zu wiederholen, können wir es also als feststehend betrachten, dass die Fortpflanzung von Stössen rings um einen Stromkreis bis zu den entferntesten Theilen desselben hauptsächlich von dem umgebenden Mittel abhängt. Der Vorgang ist etwa folgender: Man denke sich frei aufgehängt zwei lange, gerade, parallele Drähte, die in weiter Ferne mit einander verbunden sind. Nun errege man an ihren beiden zunächst liegenden Endungen zwei gleich starke, entgegengesetzte, elektromotorische Stösse, indem man sie plötzlich mit den Polen einer Batterie verbindet; oder man ertheile ihnen eine Reihe solcher Stösse vermittelst einer Wechselstrommaschine. Die Stösse verbreiten sich in den Raum. Da sie aber in entgegengesetzten Phasen vom Draht ausgehen, so interferiren sie in einem gewissen Abstand von den Drähten mit einander und heben ihre Wirkung gegenseitig auf, ähnlich wie in einiger Entfernung von den Enden einer frei aufgehängten Stimmgabel fast gar kein Ton hörbar ist. In der Nähe der Drähte aber und besonders zwischen ihnen, kann die Störung bedeutend sein. Die von der Quelle ausgehende Energie wird abgeführt, sobald sie die Drähte erreicht, sodass neue Energie beständig von aussen herzuströmen muss, um die verbrauchte zu ersetzen. Sind die Drähte sehr lang, so kann es vorkommen, dass kaum noch Energie übrig

ist, wenn die fernen Endungen erreicht sind; allein solange noch ein Vorrath da ist, wird er den Drähten zustreben und verbraucht werden, es sei denn, dass er durch irgend einen Mechanismus nutzbar gemacht und verwerthet wird, um eine sichtbare, hörbare oder chemische Wirkung zu erzeugen und auf diese Art das erwünschte Signal hervorzurufen (§ 107).

133. Die Geschwindigkeit mit der sich die Energie in der Richtung des Drahtes fortpflanzt, ist ungefähr dieselbe wie im freien Raum.[1]) Es giebt verschiedene Umstände, durch die sie verzögert, aber keine, durch die sie beschleunigt werden kann. Verzögert wird sie erstens, wenn das Mittel durch die übergrosse Nähe der beiden leitenden Drähte beengt wird, wie z. B. wenn die Drähte aus flachen, dicht auf einander gelegten Bändern bestehen, zwischen denen nur eine minimale dielektrische Schicht Platz hat, oder wenn der eine Leiter ein enges Rohr ist und der andere die Axe oder den Kern dazu bildet. In solchen Fällen nimmt der Aether an dem Vorgang nicht Theil, die ganze Energie wird durch das beengte Dielektricum befördert, und die freie Fortpflanzung der Aetherwellen ist behindert. Sie verliert den Charakter einer einfachen Wellenbewegung und nimmt mehr oder weniger den einer blossen Diffusion an, die sich wohl schnell aber doch nicht mit einer bestimmten Geschwindigkeit vollzieht, ähnlich wie Wärmeleitung oder die Diffusion von Salz in Wasser.

[1]) Anhang (o).

Dieser Umstand hat bekanntlich unter anderem die Folge, dass die einzelnen Störungen in einander verschmelzen, sodass ihre Individualität, mithin die Deutlichkeit des Signalisirens verloren geht.

134. Ein anderer Umstand, der auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Stösse störend einwirkt, ist das Beharrungsvermögen des Aethers innerhalb der Materie der leitenden Drähte; besonders wenn dasselbe gross ist, wie z. B. bei Eisendrähten. Denn die Ableitung der Energie vollzieht sich nicht genau an ihrer Oberfläche, sondern muss gewöhnlich bis zu einer gewissen Tiefe eindringen; und bis sie abgeleitet ist, kann die Zufuhr neuer Energie von aussen nicht stattfinden. Solange nun der Werth von μ für den Stoff der Drähte derselbe ist wie für die Luft oder den freien Raum, entsteht dadurch keine bedeutende Verzögerung, ausser wenn die Drähte sehr dick sind; aber wenn das Beharrungsvermögen in den Drähten 100 bis 1000 mal so gross ist wie das der Luft, so dauert es selbstverständlich länger, bis die äussere Schicht in die nöthige Rotation versetzt worden ist; auf diese Weise wird also die Fortpflanzung der Stösse mehr oder weniger verzögert. Nichtsdestoweniger bleibt der Charakter der Fortpflanzung derselbe; die reine Wellenbewegung wird nicht zur Diffusion, sodass die Signale zwar etwas langsamer, aber klar, gesondert und deutlich ankommen; nicht viel anders als ob die Dichtigkeit des umgebenden Mittels etwas zugenommen hätte.

Ich erwähnte mehrfach Herrn Poynting als einen Forscher, der Maxwell's Gleichungen entwickelt und die Frage nach der Uebertragung der elektromagnetischen Energie hell beleuchtet hat; in demselben Zusammenhange und mehr noch in Verbindung mit der allgemeinen Theorie der Telegraphie und der elektromagnetischen Wellen muss ich mit gebührendem Nachdruck den Namen des Herrn Oliver Heaviside hervorheben. Es kommt mir nicht zu, die Höhe seines Verdienstes abzumessen; die Vielseitigkeit seiner mathematischen Untersuchungen auf diesen schwierigen Forschungsgebieten ist jedoch ganz ausserordentlich.

135. Wir haben also zwei Hauptumstände, die auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eines Stosses innerhalb eines geschlossenen Stromkreises einwirken: Beharrungsvermögen oder sogenannte magnetische Susceptibilität der leitenden Substanz, hauptsächlich ihrer äusseren Schichten, und Beengung oder Drosselung des Mittels, dass die Störung überträgt. Beide Umstände vermindern die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und der zweite modificirt die Gesetzmässigkeit und beeinträchtigt die Klarheit und Individualität der einzelnen Störungen.

Ausserdem hat natürlich die Beschaffenheit des isolirenden Mittels Einfluss auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Doch bedarf dies kaum der Wiederholung; ist doch die Geschwindigkeit mit der ein gegebenes Mittel die Stösse fortpflanzt, gerade dasjenige, was wir

ermitteln wollen, und worüber wir Versuche anzustellen beabsichtigen. Wenn wir bei einem Versuch Guttapercha (oder richtiger den Aether im Guttapercha) als übertragendes Mittel anwenden, so dürfen wir nicht glauben, dass wir damit ein Resultat für Luft erzielt haben.

136. Die Bedingungen, die wir auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit störend einwirken sehen, sind äusserliche Umstände, die von der Beschaffenheit des Mittels unabhängig sind, und die wir vollständig in der Hand haben. Es steht uns frei, unser Mittel nach Belieben zu drosseln, oder dicken Eisendraht anzuwenden, aber es zwingt uns nichts dazu, und wenn wir den Versuch möglichst einfach gestalten wollen, werden wir es unterlassen. Wir werden vielmehr dünne Kupferdrähte (je dünner je besser) in zweckmässiger Entfernung von einander parallel anordnen und feststellen, wie lange es dauert, bis ein an einem Ende mitgetheilter elektrischer Impuls das andere Ende erreicht. Statt der zwei Drähte können wir auch (was im Wesentlichen dasselbe ist) einen einzelnen Draht in angemessener Entfernung über der Erde aufhängen, wie beim gewöhnlichen Telegraphen; der Stromkreis wird dann durch die Erde geschlossen.

Der Versuch würde, wenn er mit Genauigkeit ausgeführt werden könnte, eine Geschwindigkeit von 3×10^{10} cm (300,000 Kilometer) in der Sekunde ergeben. In der Praxis kann sie aus den angegebenen Gründen geringer sein, grösser ist sie nie. Dies ist

also die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für transversale Stösse, mithin für Transversalwellen, im freien Aether, soweit uns derselbe zugänglich ist.

137. Es ist mir gelungen, nach eben dieser Methode eine angenäherte vorläufige Bestimmung zu machen; ich vermeide jedoch dabei die ausserordentlich langen Drähte, indem ich das Princip der Reflexion und Interferenz anwende, um in zwei parallelen Drähten von gegebener Länge stehende Wellen zu erzielen. Die Wellen werden durch Entladungen einer Leydener Flasche erzeugt, die mit den Drähten in Verbindung steht. Abwechselnde Stösse wandern an den Drähten entlang und werden von ihren Endungen her reflektirt, genau wie bei Herrn Melde's akustischem Versuch die Stösse an einem Bindfaden entlangwandern, der an einer Stimmgabel befestigt ist. Die Reflexion der Stösse an den freien Enden der Drähte vollzieht sich nicht ohne einen bedeutenden Rückstoss, der sich durch die Helligkeit des Strahlenbüschels oder die Länge des Funkens kundgiebt. Die Länge der Drähte oder die Grösse des ganzen Entladungskreises wird so abgepasst, dass der Rückstoss ein Maximum wird. Die Länge jedes Drahts ist alsdann als eine halbe Wellenlänge anzusehen. Da nun die Eigenschwingung des Leydener Flaschenkreises bekannt ist, so lässt sich die Geschwindigkeit der Stösse sofort fesstellen. Sie stimmt mit der oben angegebenen überein.[1])

[1]) Phil. Mag. Aug. 1888. Siehe auch Anhang (o) unten.

138. Es sind den Physikern viele Versuchsmethoden bekannt, durch welche diese Geschwindigkeit indirekt bestimmt werden kann. Man hat dieselben häufiger angewandt als die oben geschilderte, sie ergeben jedoch nicht die direkte Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Stösse oder Wellen; direkt bestimmen sie nur das Verhältniss k/μ, oder, was auf dasselbe herauskommt, das Produkt $K\mu$ und es bleibt der Theorie überlassen zu beweisen, dass dies wirklich die Geschwindigkeit elektrischer Stösse im freien Aether ist. Es ist überflüssig hier näher auf diese Methoden einzugehen. Sie werden gewöhnlich bezeichnet als Methoden zur Feststellung des Verhältnisses „v" oder der Anzahl elektrostatischer Grösseneinheiten, die in einer elektromagnetischen Einheit enthalten sind; eine umständliche und gezwungene Ausdrucksweise, die aber ihren Zweck erfüllt.

KAPITEL XIV

ELEKTRISCHE STRAHLUNG ODER LICHT

139. Nachdem wir einige mögliche Methoden geschildert haben, durch welche die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Wellen oder wenigstens das Verhältniss der beiden Konstanten des Aethers k und μ (oder, was dasselbe ist, das Produkt der beiden Konstanten K und μ) gemessen werden kann, wollen wir wieder zur Betrachtung einer gewöhnlichen kleinen sich entladenden Leydener Flasche oder eines mässig grossen Wechselstromkreises von einigen Metern oder Centimetern Durchmesser zurückkehren.

Wenn die Wechselströme künstlich durch irgend eine Art von Wechselstrommaschine hervorgerufen werden, so ist natürlich ihre Periodenzahl willkürlich; werden sie jedoch automatisch durch den Entladungsstoss einer gegebenen Leydener Flasche in einen ge-

gebenen Stromkreis erzeugt, so beträgt ihre Periodenzahl bekanntlich (§ 124)

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{(LS)}} \text{ in der Sekunde,}$$

wobei L das elektrische Beharrungsvermögen oder die Selbstinduktion des Stromkreises und S die Kapacität oder den reciproken Werth der Elasticitätskonstante der Flasche bedeutet.

140. Es erscheint hier nicht zweckmässig, die Grösse L näher zu bestimmen. Eine grobe Schätzung ergiebt, dass sie für einen gewöhnlichen, offenen, einfachen Stromkreis ungefähr 10 oder 12 mal soviel beträgt wie dessen Umfang multiplicirt mit der Konstanten μ.[1])

Der Werth von S hängt ab von dem Rauminhalt und der Dicke des Dielektricums des Kondensators und beträgt bekanntlich $\frac{A}{4\pi z}$ multiplicirt mit der Konstanten K.

Das Produkt LS in dem obigen Ausdruck enthält also zwei Faktoren von linearen Dimensionen, welche die Grössen des Stromkreises und der Flasche ausdrücken, sowie einen Faktor μK, der die Eigenschaften des umgebenden Mittels ausdrückt. Mithin braucht man, soweit der Aether in Betracht kommt, für den oben angeführten Ausdruck der Schwingungsdauer nur

[1]) Siehe Anhang (e).

das *Produkt* seiner beiden Konstanten K und μ zu kennen; und da dieses aus unseren Versuchen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bekannt ist, so lässt sich die Schwingungsdauer einer gegebenen Kondensatorentladung leicht bestimmen. Auch die Wellenlänge ist leicht zu bestimmen; denn wenn in einer Sekunde n Wellen erzeugt werden, und jede Welle mit einer Geschwindigkeit v fortgepflanzt wird, so beträgt die Länge jeder Welle $\frac{v}{n}$. Folglich ist die Wellenlänge

$$2\pi \sqrt{\left(\frac{L}{\mu} \cdot \frac{S}{K}\right)}.$$

141. Wenn wir nun diese Berechnung für eine gewöhnliche Leydener Flasche aufstellen, so erhalten wir Wellen von ungefähr 50 bis 100 m Länge. Selbstverständlich können sie von jeder Länge sein, je nach der Grösse der Flasche und des Stromkreises. Je grösser diese, um so länger sind die Wellen.

Ein Kondensator mit 1 Mikrofarad Kapacität, der sich durch eine Spule mit 1 Secohm Selbstinduktion entlädt, erzeugt Aetherwellen von 1900 Kilom. Länge und seine Schwingungsdauer beträgt 157 ganze Schwingungen in der Sekunde.

Eine Leydener Flasche gewöhnlicher Konstruktion mit ungefähr $^1/_2$ Liter Inhalt, die vermittelst eines Ausladers entladen wird, erzeugt ein System von Aetherwellen, die nur ungefähr 15 bis 20 m lang sind, und

ihre Schwingungsdauer beträgt etwa 10 Millionen in der Sekunde.

Eine winzige fingerhutgrosse Leydener Flasche, die sich über ihren Rand hinweg entlädt, erzeugt vielleicht nur 1 m lange Wellen. (Siehe auch §§ 143, 157 und 158, sowie Anhang (k).)

141a. Herr J. J. Thomson hat nachgewiesen, dass wenn die Elektricität von einem Pol einer leitenden Kugel zum anderen schwingt, die ausgesandten Wellen 1.4 mal so lang sind, wie der Durchmesser der Kugel. Mir selbst ist es gelungen, Wellen zu beobachten, die von Kugeln ausgingen, deren Durchmesser nur 5 cm betrug; doch erzielt man sie leichter und deutlicher, wenn die Kugeln grösser sind. Kugeln, deren Durchmesser 16 cm beträgt, senden, wenn ihre Elektricität plötzlich durch einen Funken gestört wird, Wellen aus, die noch auf mehrere Meter Entfernung wahrnehmbar sind.[1])

Wenn die Erde einen Funken z. B. in Gestalt eines Blitzes erhält, so oscillirt ihre Ladung zwischen den Antipoden ungefähr 17 Mal in der Sekunde. Die Schwingungsdauer einer elektrischen Schwingung auf der Sonne beträgt $6^1/_2$ Sekunden; die Wellen sind mithin etwas über $1^1/_2$ Millionen Kilometer lang. Diese grossen Wellen sind wahrscheinlich zum Theil Ursache der „magnetischen Stürme" auf unserer Erde.

142. Die Stromschwingungen, die wir als die Ur-

[1]) Siehe Nature vol 41.

sache der Aetherwellen kennen gelernt haben, dauern nur kurze Zeit, wenn sie nicht auf irgend eine Art aufrecht erhalten werden. Wie lange sie dauern, hängt grossen Theils von dem Leitungsvermögen des Stromkreises ab; aber sogar bei Stromkreisen von unendlichem Leitungsvermögen müssen sie allmählich aufhören, wenn sie sich selbst überlassen bleiben, weil ihre Energie durch Strahlung verbraucht wird. Man erhält 10 bis 20, vielleicht sogar 100 wahrnehmbare Schwingungen von allmählich abnehmender Amplitude; die Geschwindigkeit der Oscillationen ist aber so gross, dass ihre Dauer trotzdem im Ganzen nur einen ausserordentlich kleinen Bruchtheil einer Sekunde betragen wird. Um z. B. Aetherwellen von 1 m Länge zu erzielen, braucht man 300 000 000 Schwingungen in der Sekunde.

Um eine dauernde Strahlung aufrecht zu erhalten, muss natürlich beständig neue Energie zugeführt werden. Geschieht dies nicht, so hört die Strahlung rasch auf. Die in der Technik gebräuchlichen Wechselstrommaschinen sind künstliche schwerfällige Vorrichtungen, um in Stromkreisen mit endlichem Widerstand trotz des Verlusts durch Strahlung elektrische Schwingungen aufrecht zu erhalten.

Bei den meisten praktisch verwertheten Stromkreisen ist der Verlust durch Strahlung ein so kleiner Theil des gesammten Verlustes, dass er kaum berücksichtigt zu werden braucht; wir sind jedoch nicht an die Betrachtung von solchen Stromkreisen oder von

den bisher erfundenen und angewandten Wechselstrommaschinen gebunden; vielmehr wäre vielleicht eine minder direkte Methode — etwa ein chemisches Verfahren — denkbar, wodurch einem oscillirenden Stromkreise Energie zugeführt und das, was sonst eine einmalige Entladung oder ein Funken gewesen wäre, in eine dauernde Strahlungsquelle verwandelt werden könnte.

143. Bisher beschäftigten wir uns nur mit den gebräuchlichen elektrischen Stromkreisen und fanden, dass ihre Wellen zwar immer ziemlich lang sind, dass sie aber sichtlich kürzer werden, je kleiner der Stromkreis ist. Fahren wir nun fort, diesen zu verkleinern, und fragen wir uns, wie klein der Stromkreis sein muss, dessen Wellen nur 6000×10^{-8} cm ($^3/_5$ eines Mikrons) lang sind, so brauchen wir nur

$$2\pi \sqrt{\left(\frac{L}{\mu} \cdot \frac{S}{K}\right)} = 0{,}00006$$

zu setzen, um zu finden, dass der betreffende Stromkreis eine Selbstinduktion in elektromagnetischen Einheiten und Kapacität in elektrostatischen Einheiten von solcher Grösse haben muss, dass ihr geometrisches Mittel 10^{-5} cm beträgt.

Dies ergiebt für unseren Stromkreis annähernd atomistische Dimensionen und legt den Gedanken nahe, dass jene kurzen Aetherwellen, die auf unsere Netzhaut einwirken, und die wir als „Licht" zu bezeichnen pflegen,

eigentlich durch elektrische Oscillationen oder Erschütterungen in Stromkreisen von atomistischen Dimensionen erregt sein könnten (§§ 157—159).

Ist, nachdem die Schwingungen erregt worden sind, keine Energiequelle vorhanden, die im Stande wäre, sie zu erhalten, so hört die Lichterzeugung bald wieder auf, und wir haben nur das vorübergehende Phänomen der Phosphorescenz; wenn dagegen eine entsprechende Zufuhr an Energie stattfindet, so dauern die elektrischen Schwingungen fort und treten nicht blos als vergängliche Helligkeit, sondern als stetiges und dauerhaftes Licht in die Erscheinung.

Vergleich zwischen der Geschwindigkeit der elektrischen Strahlung und der Geschwindigkeit des Lichts, im freien Raum und in festen Stoffen

144. Wir haben damit die heute allgemein bekannte Maxwell'sche Theorie des Lichts ausgesprochen, nach der das Licht durch elektrische Schwingungen erzeugt wird und Lichtwellen elektrische Wellen sind.

Welche Gründe aber berechtigen uns zu dieser Hypothese? Zunächst der Umstand, den wir oben anführten: Wellen, die in jeder Beziehung, ihre Länge ausgenommen, mit den Lichtwellen übereinstimmen, (d. h. Transversalschwingungen sind, welche sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit durch den Aether

bewegen) können vermittelst bekannter und sehr einfacher Methoden in praktisch ausführbaren Stromkreisen vorübergehend erzeugt werden und könnten auch in der für jedes gegebene Licht erforderlichen Länge hervorgerufen werden, wenn wir im Stande wären, mit Stromkreisen von ultramikroskopischer Grösse umzugehen. Die einfachste weitere Frage, die sich unserer Betrachtung darbietet, ist folgende:

Bewegt sich das Licht mit derselben Geschwindigkeit wie unsere elektrischen Störungen? Wir schilderten oben eine der Methoden zur Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Strahlung im freien Raum; es giebt aber noch viele andere. Sie alle ergeben den Werth von 300 000 Kilom. in der Sekunde. Ist die Geschwindigkeit des Lichts dieselbe?

Methoden zur Messung der Geschwindigkeit des Lichts sind seit lange bekannt, sie ergeben für Luft oder den freien Raum gleichfalls 300 000 Kilom. in der Sekunde. Beide Geschwindigkeiten sind also im freien Raum gleich. Mithin darf man wohl Licht und elektrische Strahlung als identisch ansehen.

145. Aber es giebt noch einen weiteren Beweis. Die Geschwindigkeit der elektrischen Strahlung war nicht in allen Mitteln gleich; sie hing ab von der elektrischen Elasticität und der Dichtigkeit des Aethers in der durchlässigen Substanz; mit andern Worten sie war gleich dem reciproken Werth des geometrischen

Mittels von deren specifischer Induktionskapacität und ihrer magnetischen Permeabilität —

$$v = \frac{1}{\sqrt{(K\mu)}}.$$

Obgleich wir nun zwar weder den absoluten Werth von K noch von μ kennen, so ist doch ihr Werth relativ zur Luft oft gemessen und für die meisten Stoffe bekannt.

Auch können wir leicht die Geschwindigkeiten, mit denen sich das Licht in einem gegebenen Stoff und im freien Raum fortpflanzt, mit einander vergleichen. Man nennt dies den Brechungsindex einer Substanz aufsuchen. Der Brechungsindex bedeutet einfach das Verhältniss der Geschwindigkeit des Lichts im freien Raum zu seiner Geschwindigkeit in einer gegebenen Substanz. Der reciproke Werth des Brechungsindex ist also die relative Geschwindigkeit des Lichts. Wenn wir nun den Brechungsindex n nennen, so muss, wenn die elektrische Theorie des Lichts richtig ist, $n^2 = K\mu$ sein, oder der Brechungsindex einer Substanz muss das geometrische Mittel ihrer elektrostatischen und magnetischen specifischen Kapacität sein.

146. Dass dies für alle Substanzen genau zuträfe, kann vorläufig nicht behauptet werden. Bei einigen ist es richtig, bei anderen nicht; es bleibt noch übrig festzustellen, ob diese Ausnahmen nicht blos scheinbar sind; und wenn sie es nicht sind, worauf ihr abweichendes Verhalten zurückzuführen ist.

Man muss sich darüber klar werden, worin der wesentliche Punkt besteht. Verschiedene Forschungsmethoden haben erwiesen, und zwar um so zuverlässiger, je genauer diese Methoden inzwischen geworden sind, dass elektrische Störungen, wie z. B. lange, durch eine Wechselstrommaschine ausgesandte Wellen sich durch die Luft oder den freien Raum mit genau derselben Geschwindigkeit fortpflanzen, wie Licht; mit anderen Worten, dass zwischen Wellen, die mehrere 100 Kilom. lang sind, und Wellen, die so klein sind, dass Hunderttausende auf einem Centimeter Platz haben, kein wahrnehmbarer Unterschied vorhanden ist. Dies gilt für den freien Aether und ist eine bemerkenswerthe Thatsache. Soweit man daraus überhaupt auf den Bau des Aethers schliessen darf, beweist sie, dass er kontinuirlich, homogen und einfacher ist als jede andere Substanz; oder wenigstens, dass, wenn er irgendwie heterogen konstituirt ist, die einzelnen Theile, aus denen er besteht, so unendlich klein sind, dass Grössen wie 100 Kilom. und 1 Mikron (Tausendstel Millimeter) ihnen gegenüber zur selben Ordnung gehören. Seine Theile verhalten sich gegen diese verschiedenen Wellenlängen in genau derselben Weise.

Aber sobald wir es mit gewöhnlicher Materie zu thun haben, ist dies durchaus nicht mehr der Fall. Die Materie besteht aus Molekeln, die zwar klein, aber keineswegs unendlich klein sind. Atome sind allerdings kleiner als Lichtwellen, aber nicht unvergleichlich viel

kleiner. Mithin liegt es nahe anzunehmen, dass der durch die Materie modificirte Aether in ähnlicher Weise heterogen verändert wird und daher nicht mehr im Stande ist, sich gegen Wellen jeder Grössenordnung in gleicher Weise zu verhalten.

Die Geschwindigkeit aller Wellen wird durch den Eintritt in die Materie verzögert; am meisten, wie sich erwarten lässt, die der kleinsten Wellen. Sogar innerhalb der Grenzen solcher Lichtwellen, die auf die Netzhaut einwirken, ist diese Erscheinung deutlich ausgeprägt; die kleineren Wellen, die bei uns die Empfindung des Blau hervorrufen, werden durch Glas oder Wasser stärker aufgehalten und etwas langsamer fortgepflanzt als die grösseren, welche die Empfindung des Roth erzeugen. Diese Erscheinung ist seit lange bekannt und heisst Dispersion. Eine ihrer Folgen ist die, dass wir nicht ohne Weiteres aus der blossen Kenntniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeit ultramikroskopischer Lichtwellen auf die Geschwindigkeit kilometerlanger Wellen schliessen können.

147. Aber es kommt sogar noch mehr hinzu. Ausser der Dispersion besitzt die Materie die Eigenschaft, die Lichtwellen relativ zu absorbiren. Sie überträgt nicht nur Wellen von verschiedener Grösse mit verschiedener Geschwindigkeit, sondern sie absorbirt und vernichtet einige viel schneller als andere. Wenige, vielleicht gar keine Stoffe sind für alle Wellengrössen gleich durchlässig. Glas z. B. lässt die sichtbaren Wellen

ziemlich gleichmässig durch, dagegen ist es fast ganz undurchlässig für zwei bis drei Mal längere oder kürzere Wellen. Sobald nun diese Form der Absorption eintritt, unterliegt die Dispersion so ausserordentlichen Abweichungen, dass sie häufig als „anorm" bezeichnet wird; womit natürlich nicht gesagt sein soll, dass sie ungesetzmässig ist, sondern nur, dass ihre Gesetze unbekannt sind. Die Dispersion ist ohnehin ein wenig bekanntes Gebiet; sie wird aber noch schwieriger, wenn sie durch Absorption komplicirt ist.[1]) Erst wenn man mehr von der Theorie der Dispersion weiss, wird man berechnen können, wie schnell Wellen von einer gegebenen Länge sich fortpflanzen müssen. Bis dahin kann man ihre Geschwindigkeit nur experimentell bestimmen. Dies ist sowohl für lange elektrische, als auch für kurze Lichtwellen geschehen; bei einigen Stoffen sind die Geschwindigkeiten gleich, bei anderen nicht. Dass sie nicht übereinstimmen, ist jedoch nach obiger Erklärung ganz begreiflich und darf keineswegs dahin gedeutet werden, dass Lichtwellen und elektrische Wellen nicht im Wesentlichen identisch sind. Dass sie überhaupt gleiche Geschwindigkeiten haben, ist an sich schon beachtenswerth; in der Luft stimmen diese anscheinend vollständig überein; nahezu völlig auch in einigen einfachen Stoffen, wie Schwefel und der Gruppe der Kohlen-

[1]) Herr Hopkinson zeigte zuerst die Anwendbarkeit dieser Thatsache auf den vorliegenden Fall. (B. A. Report 1886 pag. 309.)

wasserstoffe, die als Paraffine bekannt sind; wogegen die Uebereinstimmung in künstlichen Stoffen, wie Glas, und in organischen Substanzen, wie Fetten und Oelen, minder befriedigend ist.

148. Soviel von diesem wesentlichsten Punkt, der Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer und optischer Störungen. In wenigen Fällen ist sie gleich, niemals ist sie ganz verschieden, und da, wo die Uebereinstimmung nur eine annähernde ist, erklärt sich der Unterschied in erschöpfender und befriedigender Weise aus der ausserordentlichen Verschiedenheit der beobachteten Wellenlängen. Um die Geschwindigkeiten richtig mit einander zu vergleichen, müsste man ein Mittel ersinnen, dass die elektrischen Wellen verkürzte oder die Lichtwellen verlängerte, bis beide gleich gross wären.

Es unterliegt kaum einem Zweifel, dass sie sich als identisch herausstellen werden.

Künstliche Lichterzeugung

149. Die Erkenntniss, dass Licht eine elektrische Störung ist, und Lichtwellen durch elektrische Schwingungen erregt werden, muss schliesslich, vielleicht sogar schon in nächster Zeit, zu grosser Bedeutung für die Technik gelangen.

Das System, nachdem wir gegenwärtig künstlich Licht erzeugen, ist verschwenderisch und unwirksam.

Zur Lichterzeugung sind Schwingungen nöthig, deren Periode zwischen 700 und 400 Billionen in der Sekunde schwankt; andere nützen uns nichts, weil sie nicht auf unsere Netzhaut einwirken; solche Schwingungen aber können wir nicht willkürlich erzeugen. Wir können Schwingungen hervorrufen, deren Periode 100 bis 200 oder 1000 in der Sekunde beträgt, d. h. wir können reine Töne in jeder beliebigen Abstufung erregen und vermittelst eines Blasebalges und einer Klaviatur dauernd aufrecht erhalten. Wir können gleichfalls (obschon dieser Umstand weniger bekannt ist) auf Augenblicke bestimmte Aetherschwingungen mit einer Schwingungsdauer von einigen Millionen in der Sekunde erzeugen, wie ich oben ausführlich erklärt habe; aber wir wissen vorläufig noch nicht, wie wir diese Schwingungen aufrecht erhalten sollen. Um noch raschere Oscillationen zu erhalten, sind wir auf die Atome angewiesen. Wie man Atome in Schwingung versetzt, wissen wir; es geschieht, indem man eine Substanz „erwärmt"; und wenn wir im Stande wären, auf einzelne Atome unabhängig von den übrigen einzuwirken, so wäre es vielleicht möglich, ihnen reine, einfache Schwingungen abzugewinnen. Möglich, aber unwahrscheinlich; denn selbst isolirten Atomen sind unzählige Schwingungsarten eigen, von denen wir nur wenige brauchen können, und wir vermögen nicht die einen ohne die andern zu erregen. Vorläufig aber haben wir es noch nicht einmal mit einzelnen Individuen zu thun, sondern mit

einer kompakten Masse von zusammengedrängten Atomen, sodass ihre Schwingungsarten geradezu unendlich sind.

Wir nehmen ein Stück Materie, etwa einen Kohlefaden oder ein Stück ungelöschten Kalk, und versetzen seine Atome durch Erwärmen in immer raschere Schwingungen, nicht indem wir die langsameren in schnellere verwandeln, sondern indem wir den langsameren schnellere superponiren, bis diejenige Geschwindigkeit der Oscillation erzielt ist, welche auf unsere Netzhaut einwirkt. Dann sind wir zufrieden. Aber wie verschwenderisch, wie umständlich, wie empirisch ist dieser Vorgang! Wir brauchen Schwingungen von einer bestimmten Geschwindigkeit und wissen uns nicht anders zu helfen, als indem wir die ganze Serie erzeugen. Es ist, als wollte man, um ein hohes Register von Orgelpfeifen ertönen zu lassen, sämmtliche Tasten und Pedale in Bewegung setzen und einen kleinen Sturmwind entfesseln.

150. Ich habe absichtlich als Beispiele die vollkommensten Methoden der künstlichen Lichterzeugung gewählt, bei denen die verschwendete Strahlung nur unnütz, nicht schädlich ist. Das altmodische Verfahren war noch roher; es bestand einfach darin, einen Gegenstand zu verbrennen; wobei nicht blos das Brennmaterial, sondern auch die Luft verbraucht und gleichzeitig eine gewaltige Strahlung erzeugt wurde, in deren vergeudeten Wellen wir uns geduldig schmoren liessen, jenem ver-

schwindend kleinen Bruchtheil zu Liebe, der uns Licht gewährte.

Heut zu Tage weiss Jeder, dass Verbrennung keine angenehme und gesunde Art ist, Licht zu erzeugen; aber nicht Jeder macht sich klar, dass die Beleuchtung durch Glühlicht ein fast ebenso verschwenderisches und unbefriedigendes Verfahren ist und wahrscheinlich nur noch wenige Jahrzehnte, höchstens ein Jahrhundert, geübt werden wird.

Man betrachte die Feuerungen und Kessel einer grossen Dampfmaschine, die eine Gruppe von Dynamomaschinen treibt und schätze die dort verausgabte Energie; dann betrachte man die glühenden Kohlefäden in den durch sie gespeisten Lampen und überschlage, wieviel der ausgestrahlten Energie dem Auge zu Gute kommt. Sie verhält sich wie eine Stimmgabel zu einem ganzen Orchester.

Es ist nicht zuviel gesagt, dass ein Knabe durch das Drehen einer Kurbel, bei entsprechender Ausnützung seiner Energie, ebensoviel wirkliches Licht erzeugen könnte, als jener ungeheuere Aufwand von Maschinen und Brennmaterial.

151. Man könnte vielleicht glauben, es läge etwas Naturwidriges in der Hoffnung, eine specifische Art der Strahlung von den übrigen zu sondern und nutzbar zu machen; allein Lord Rayleigh hat in einer kurzen Mittheilung an die British Association in York [1]) nachge-

[1]) Brit. Ass. Report 1881 p. 526.

positiven und negativen Räder sich fast um gleich viel drehen, so entsteht nur — durch das elastische Nachgeben der Räder — eine kleine zeitliche Verschiebung des einen Rades gegen das andere. Die magnetischen Schwingungen dagegen vollziehen sich sämmtlich in einem Sinne; zwar rotiren die positiven Räder in der einen Richtung, die negativen in der andern, aber alle wirken zusammen, sodass die magnetische Oscillation ausgeprägter ist als die elektrische; man spricht daher oft von elektro-magnetischer Strahlung statt von elektrischer Strahlung. Die Energie der elektrostatischen Spannung ist aber ebenso gross wie die der elektromagnetischen Bewegung; in der That verwandelt sich die Energie in jeder Viertel-Schwingung aus der potentiellen in die kinetische Form und umgekehrt, gerade wie bei jeder andern Schwingung.

153. Uebrigens sind auch die magnetischen Schwingungen sehr klein. Denn man denke sich nur, dass sich das Räderwerk nach allen Richtungen ins Unendliche erstreckt; wie soll eine mässige Kraft diese Räder in Schwingungen versetzen? Wären sie starr, so wäre es unmöglich; da sie aber elastisch sind, so kann wenigstens eine geringe Schwingungsweite erreicht werden. So entsteht denn, wie gesagt, rings um ein solches Rad eine Spannung, die sich von der Quelle aus rasch nach allen Richtungen verbreitet.

Wenn sich dagegen die Quelle in einem vollkommenen Leiter befände, wenn man z. B. eines der

Räder innerhalb des leeren Rahmens auf Fig. 38 oscilliren lassen wollte, so würde das weiter keine Schwierigkeiten haben; die Räder sind in ihrer Zahl beschränkt und können auch durch eine schwache Kraft in ziemlich starke Schwingungen versetzt werden.

Einen solchen Vorgang nennt man gewöhnlich Concentration des Lichts durch Reflexion und man sagt, der Leiter wirke wie ein vollkommener Spiegel. Da kein Licht daraus entweicht, kann innerhalb eines solchen geschlossenen kugelförmigen Spiegels mit vollkommenem Leitungsvermögen jeder beliebige Grad von Helligkeit erzielt werden. Allerdings nützt diese Helligkeit nicht viel; denn sobald man ein Stück Materie einführt, um sie aufzunehmen, wird die Energie an seiner Oberfläche abgeleitet und die Heftigkeit der Aetherstörung sofort abgeschwächt. Aber selbst angenommen, dass diese Ableitung stattfindet, und dass die reflektirende Oberfläche keineswegs vollkommen leitet, sondern nur aus Silber, dem besten bekannten Leiter besteht, so wird doch eine wesentlich grössere Helligkeit erzielt — durch Reflexion, wenn man sich so ausdrücken will; oder, wie wir nunmehr vorziehen dürften zu sagen, weil das Mittel, auf das von einer gegebenen Quelle aus eingewirkt werden soll, wenigstens nach einigen Richtungen hin begrenzt ist. (§ 164.)

154. Herr Fitzgerald aus Dublin hat ein Aethermodell konstruirt, das mit Hülfe einiger Kunstgriffe

die elektrische und magnetische Verrückung sehr einfach und deutlich veranschaulicht.

Seine Räder sind durch einen Zwischenraum von einander getrennt und durch Gummibänder gekuppelt. Sie drehen sich also sämmtlich in einer Richtung, sodass positive und negative Elektricität nicht als verschiedene Elemente betrachtet zu werden brauchen.

Da aber die Räder massiv sind, so braucht eine rotatorische Störung, die einem derselben mitgetheilt

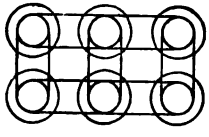


Fig. 48. — Aethermodell von Fitzgerald. Ein System von Messingrädern mit massivem Rand, die auf festen Achsen drehbar und durch Gummibänder gekuppelt sind. Entfernt man die Gummibänder an einer Stelle, so wird diese zu einem vollkommenen Leiter, in den keine Störungen eindringen können. (Vergl. Fig. 38.) — Verh. der Roy. Dub. Soc. Jan. 1885.

wird, eine gewisse, von der Elasticität der Gummibänder und der Trägheit des Räderwerks abhängige Zeit um sich durch das ganze System zu verbreiten. Ferner wird während der Periode der Beschleunigung die eine Seite jedes Gummibandes angespannt, während die Spannung der anderen nachlässt, wodurch das Gummiband an dieser Stelle anschwillt. Dieses Anschwellen der Gummibänder vollzieht sich in einer Richtung und entspricht einer elektrischen Verrückung in dieser Richtung, welche normal zur Fortpflanzungsrichtung der Störung verläuft.

Eine Räderreihe entspricht dem Durchschnitt einer Wellenfläche; die Verrückungen der Gummibänder und der rotirenden Achsen, d. h. die elektrischen und magnetischen Störungen, liegen beide in der Wellenfläche.

155. Das ursprünglich von Clerk Maxwell vorgeschlagene Aethermodell war diesem nicht unähnlich.[1]) Es bestand aus einem System massiver Räder, die aber nicht durch Gummibänder, sondern durch eine Reihe elastischer Theilchen, sogenannter „Hülfsräder", mit einander verbunden waren. Diese Theilchen stellten die Elektricität dar; ihre Verrückung während der Periode der Beschleunigung entsprach dem einseitigen Anschwellen der Gummibänder bei dem Fitzgerald'schen Modell. Diese Hülfsräder sollten es den Haupträdern ermöglichen, sich durchweg in einem Sinne zu drehen, wie es auch auf Fig. 35 angestrebt wurde.

Ich selbst habe eine doppelte Serie von direkt in einander eingreifenden Rädern vorgeschlagen, die abwechselnd positive und negative Elektricität darstellen, weil soviele Thatsachen auf das Vorhandensein dieser beiden Elemente hinzudeuten scheinen. Alsdann brauchen wir auch nicht zu unterscheiden zwischen dem Theil des Mittels, der Aether, und dem Theil, der Elektricität ist, sondern das Ganze ist Aether und ist zugleich auch Elektricität; während nichtsdestoweniger

[1]) Phil. Mag. April 1861.

eine sehr nothwendige Unterscheidung gemacht werden kann zwischen der Bewegung des Aethers als Ganzes und der relativen Bewegung seiner einzelnen Bestandtheile; d. h. zwischen solchen Kräften, die den Schwerpunkt einer endlichen Aethermasse verändern, und solchen, die den Aether abscheren und seine Bestandtheile nöthigen, in entgegengesetztem Sinne an einander vorbeizugleiten; letztere Kräfte sind die eigentlich elektromotorischen. (§ 120.)

156. Wenn wir nun fragen, wie die Elasticität des Aethers zu erklären ist, so gelangen wir zu der von Herrn Fitzgerald [1]) und Herrn Hicks [2]) ausgehenden Theorie des Wirbelschwamms, die in neuester Zeit durch Sir W. Thomson [3]) eingehender bearbeitet worden ist. Dieser Gegenstand ist jedoch zu komplicirt, um sich vorläufig zur populären Darstellung zu eignen. Wir müssen uns mit der Versicherung begnügen, dass diejenigen Punkte, die hier unerklärt bleiben, deshalb nicht nothwendigerweise unerklärbar sind. Die Erklärungen sind vielmehr nur noch nicht so vollständig ausgearbeitet, dass sie durch einfache Bilder und Begriffe dem grossen Publikum zugänglich gemacht werden könnten. Wenigstens aber giebt uns Sir W. Thomson mit Hülfe von Gyrostaten in seinem Artikel über

[1]) Proc. R. Dub. Soc. Jan. 1885.

[2]) Brit. Ass. Report 1885, Aberdeen p. 930.

[3]) Ebenda 1887, Manchester, p. 486; sowie Phil. Mag. Oct. 1887. Siehe auch die Einleitung dieses Buches.

„Elasticität" in der Encyclopaedia Britannica[1]) in allgemeinverständlicher Weise Aufschluss über die Art, wie die Wirkungen der Elasticität durch Bewegung vorgetäuscht werden können; überhaupt muss die Thatsache, dass man die elastische Starrheit fester Körper erzeugen kann, indem man ein homogenes, strukturloses Fluidum in Bewegung versetzt, als eine von Thomson's glänzendsten Entdeckungen betrachtet werden.

Wir sahen uns im III. Theil veranlasst, anzunehmen, dass der Aether aus Zellen zusammengesetzt ist, die rotirende Elektricität enthalten, und dass der Vorgang des Magnetisirens darin besteht, diese Wirbel übereinstimmend zu richten. Nach Sir W. Thomson verhält sich ein mit derartigen Wirbeln erfülltes Mittel wie ein elastischer fester Körper; die blosse Wirbelbewegung reicht aus, um die Erscheinung der Elasticität zu erklären (Fig. 46). Mit dieser Andeutung, die ausführlicher entwickelt werden könnte, wollen wir dieses Gebiet verlassen.

157. Wie wir gesehen haben, ist zur Erzeugung von Strahlung eine elektrische Oscillation nothwendig und ausreichend. Bisher fassten wir hauptsächlich eine Art der elektrischen Oscillation ins Auge, nämlich diejenige, welche in dem Stromkreis eines Kondensators auftritt, wenn seine Elektricität plötzlich anders vertheilt wird,

[1]) Vgl. ferner in einem neuen Band der Nature Series: Popular Lectures and Adresses Bd. I den Artikel „The Constitution of Matter".

wie z. B. durch eine Entladung (§§ 124, 141). Es ist jedoch nicht nöthig, den Stromkreis äusserlich wie eine Leydener Flasche zu gestalten; man kann sich auch eines geladenen Cylinders bedienen, dessen statische Ladung hauptsächlich an dem einen Ende angesammelt und dann plötzlich befreit wird. Das Zurückschnellen der Ladung ist ein wirklicher Strom, wenn auch nur ein schwacher; er ist mit einem gewissen Grad von Beharrungsvermögen verbunden, und es entstehen infolgedessen Schwingungen; die Ladung wallt von einem Ende des Cylinders zum andern, wie Wasser in einer schräg gehaltenen Wanne, die plötzlich wagerecht gestellt wird.

In kugelförmigen und anderen Leitern können dieselben elektrischen Schwingungen stattfinden; ihre Theorie ist von Herrn Niven, sowie von Herrn Lamb mit grossem mathematischen Scharfsinn ausgearbeitet worden.[1])

Es besteht aber kein wesentlicher Unterschied gegenüber dem gewöhnlichen Stromkreis einer Leydener Flasche oder eines Kondensators; denn die Enden des Cylinders haben eine gewisse Kapacität und der Mantel eine gewisse Selbstinduktion; die Schwierigkeit des Problems besteht hauptsächlich darin, den Werth dieser beiden Grössen für einen gegebenen Fall

[1]) Phil. Trans. 1881 und 1883. Auch von Prof. J. J. Thomson, Math. Soc. Proc. April 1884.

zu finden. Man wird noch immer für eine Schwingungsperiode

$$2\pi\sqrt{(LS)}$$

setzen können; da aber L und S beide sehr klein sind, so wird die Schwingungszahl wahrscheinlich ausserordentlich gross sein. Und wenn wir zu den Schwingungen einer Atomladung kommen, kann die Schwingungszahl leicht sogar diejenige Höhe überschreiten, für welche das Auge empfindlich ist. Solche Schwingungen werden, wenn sie sich selbst überlassen bleiben, sehr schnell vernichtet werden, weil die Anfangsgeschwindigkeit nur gering ist. Es lässt sich berechnen, dass die Schwingungen einer Atomladung nur ultraviolette Strahlen hervorbringen würden. Dass diese ultravioletten Strahlen mit der Schwingungsperiode der Atomladungen übereinstimmen, ist wahrscheinlich der Grund, weshalb sie so ungewöhnlich starke chemische Wirkungen haben (§ 187).

157 a. Die Wellen des sichtbaren Lichts sind, falls sie durch elektrische Oscillationen in Atomen erzeugt werden, jedenfalls nicht auf einfache Oscillationen in leitenden Kugeln zurückzuführen, sondern auf ein Hin- und Herwallen der Ladung in leitenden Bahnen, ähnlich wie bei dem Stromkreis einer Leydener Flasche. Wahrscheinlicher ist es aber, dass die Schwingungen, die gewöhnliches Licht erzeugen, mechanische Schwingungen der Substanz der Atome sind, und dass die elektrische

Störung, die sie begleitet und auf welche unsere Netzhaut reagirt, nur eine Nebenerscheinung ist.

Ich habe auch darauf aufmerksam gemacht [1]), dass die Stäbchen und Zapfen in der Netzhaut den geeigneten Durchmesser besitzen, um auf elektrische Oscillationen von der Schwingungszahl des sichtbaren Lichts zu reagiren; und mit Hülfe einer abgestuften Reihe von Metallcylindern, die ich mit ihren Enden der Quelle einer elektrischen Störung gegenüber anbrachte, ist es mir gelungen, gewissermassen eine Netzhaut nachzubilden, die im Stande ist, nach Art der Corti'schen Fasern im Ohr, Schwingungen von einer bestimmten Frequenz auszuwählen und auf sie zu reagiren. (Siehe weiter unten Fig. 60.) Vorläufig fehlt jedoch noch eine physiologische Basis für diejenigen Grössenordnungen der Stäbchen und Zapfen, die den drei Farbenempfindungen roth, grün und violett entsprechen würden.

Die Uebereinstimmung zwischen dem Durchmesser der Zapfen und Stäbchen und der Wellenlänge des gewöhnlichen Lichts kann eine rein zufällige sein; aber wahrscheinlich ist dies gerade nicht.

Vermuthlich ist die Sehkraft ein chemischer Sinn: irgend welche molekularen Complexe werden durch den Anprall synchroner Aetherwellen zersetzt und reizen auf diese Weise die damit zusammenhängenden Nervenfasern. Die durch das Gewebe zugeführte Nahrung

[1]) Nature Bd. 41 p. 462 März 1890.

dürfte hinreichen, um die Substanzen fast ebenso schnell wieder aufzubauen, wie sie zersetzt werden; der zweite Vorgang bleibt jedoch um ein geringes gegen den ersten zurück, was der beobachteten „Netzhautermüdung" entspricht.

158. Ob nun eine Ladung in einem feststehenden Leiter oscillirt oder ob der geladene Körper als Ganzes schwingt, jedenfalls rufen beide einen Wechselstrom hervor und sind als eine Strahlungsquelle anzusehen. Bei Betrachtung der Elektrolyse gelangten wir zu der Annahme, dass die Molekeln aus zwei Atomen oder Atomgruppen bestehen, die gleich stark mit entgegengesetzten Elektricitätsgattungen geladen sind. Nun ist es denkbar, dass unter der Einwirkung von Wärme die einzelnen Bestandtheile in Schwingung gerathen, wie die Enden einer Stimmgabel, wobei die Schwingungsdauer von den Konstanten der betreffenden Molekel abhängig und für sie charakteristisch ist. Da aber die Atome geladen sind, so ist ihre mechanische Oscillation unzertrennlich von einer elektrischen Oscillation, durch welche eine elektrische Strahlung erregt und fortgepflanzt wird. Diese Schwingungen haben wahrscheinlich oft diejenige Periode, auf die unsere Netzhaut reagirt; die schwingenden Atome sind also indirekt unsere gewöhnliche Lichtquelle. Die Schwingungszahl der sichtbaren Strahlung kann durch optische Mittel untersucht und bestimmt werden (durch irgend einen Interferenzversuch, gewöhnlich mit einem Diffrak-

tionsgitter) und auf diese Weise lernen wir viele der Schwingungsarten kennen, die den Atomen einer gegebenen Molekel unter gegebenen Verhältnissen möglich sind. Dies ist die Grundlage der Spektroskopie.

Möglicherweise ist die lange Dauer einiger Arten der Phosphorescenz darauf zurückführen, dass die Atome indirekt einen Theil der Aetherstörung empfangen und sie durch ihr eigenes Beharrungsvermögen verlängern, statt sie dem weit geringeren Beharrungsvermögen des freien Aethers zu überlassen. Möglich auch, dass die abgegrenzte Leuchtkraft gewisser fluorescirender Stoffe auf den ihren Atomen eigenthümlichen Schwingungsperioden beruht, die, durch den Empfang der Strahlung indirekt gestört, dieselbe Strahlung modificirt und sozusagen beschwert wieder aussenden.

159. Um eine nähere Vorstellung davon zu erhalten, wie eine oscillirende Ladung oder ein oscillirender geladener Körper die Strahlung fortpflanzt, wende man sich wieder zu Fig. 39 im III. Theil und denke sich die Zahnstange hin und her oscillirend. Auf diese Weise versetzt sie die eingreifenden Zahnräder in rotatorische Oscillationen, diese übertragen sie weiter auf die nächstliegenden und so fort. Wenn das Räderwerk starr wäre, würde sich die Bewegung mit unendlicher Geschwindigkeit den entferntesten Rädern mittheilen; ist es aber elastisch, so hängt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, wie wir zur Genüge erörtert haben, von der Elasticität und Dichtigkeit ab. Die Bahn der

Zahnstange entspricht der Richtung der elektrischen Oscillation und die Achsen der Räder der Richtung der magnetischen rotatorischen Oscillation. Die Richtung, in der die Wellen fortschreiten, verläuft senkrecht zu diesen beiden. Freilich ist das Diagramm keine räumliche Darstellung, sondern nur ein Durchschnitt und nur der Entwurf zu einer mechanischen Analogie des eigentlichen Vorgangs.

Da die Räder vollkommen in einander und in die Zahnstange eingreifen, so stellen sie einen Isolator oder ein Dielektricum dar; Gleitung oder Verbrauch der Energie durch Reibung findet nicht statt; mit andern Worten, es ist kein eigentlicher Strom vorhanden. Vielmehr ist die elektrische Oscillation nur eine oscillatorische Verrückung, die auf der Elasticität der Räder und ihrem zeitweisen Nachgeben beruht, und durch welche die Räder während jeder Periode der Beschleunigung in den Zustand gelangen, der auf Fig. 46 als Gegensatz zu Fig. 37 dargestellt ist.

Wirkungen, die durch das Zusammentreffen mit einem neuen Mittel entstehen

160. Man vergegenwärtige sich ein fortschreitendes Wellensystem und stelle sich vor, dass es einem Hinderniss begegnet, z. B. einem Mittel, das dichter oder weniger elastisch, oder beides ist. Wenn das neue

Mittel vollkommen isolirt, so hat man sich zu denken, dass der Eingriff seiner Räder in einander und in die Räder des ersten Mittels vollkommen ist, sodass keine Gleitung oder Verwendung der Energie an seiner Oberfläche stattfindet. In diesem Fall geht keine Strahlung verloren; sie wird, den gewöhnlichen, allgemein bekannten, mechanischen Gesetzen zufolge, theils reflektirt, theils übertragen. Der übertragene Theil fängt plötzlich an, sich langsamer fortzubewegen, und schlägt daher, wenn der Einfallswinkel schief ist, eine etwas veränderte Richtung ein. Hierzu kommen noch gewisse Wirkungen an den Rändern des Hindernisses oder an der Begrenzung eines künstlich eingeschränkten Theils der Welle, die darauf zurückzuführen sind, dass die Störung sich ausbreitet und Theile des Mittels ergreift, die nicht in ihrer direkten Bahn liegen. Diese Wirkungen der Refraction und Diffraction sind allen Arten der Fortpflanzung durch Wellen eigen, und es ist im Wesentlichen über elektrische Strahlung nichts zu berichten, was nicht auch in jedem Werk über den entsprechenden Theil der Optik zu finden wäre.

161. Ueber den Betrag und die Richtung der reflektirten Schwingungen wäre dagegen mancherlei ungemein Wichtiges zu sagen [1]); doch ist dieser Gegenstand so schwierig, dass wir ihn besser ganz übergehen. Vielleicht können wir später einmal diese Lücke ausfüllen.

[1]) Lord Rayleigh, Phil. Mag., Sept. 1888.

Wenn der Eingriff des alten Mittels in das neue unvollkommen ist, wenn sich z. B. zwischen ihnen eine Schicht von gleitenden Rädern befindet, die ein mehr oder weniger leitendes Häutchen bildet, so kann die Strahlung nicht vollständig reflektirt und übertragen werden, sondern muss sich zum Theil an der Oberfläche verbrauchen. Dann würde das Häutchen sich bis zu einem gewissen Grade erwärmen. Durch ein solches Häutchen könnten die Gesetze der Reflexion durchgreifende Veränderungen erleiden, ebenso wenn der Uebergang von einem Mittel zum andern nicht plötzlich, sondern allmählich stattfände. Alle diese Möglichkeiten liegen aber vorläufig im Bereich der unausgefüllten Lücke.

Zusammentreffen der elektrischen Strahlung mit einem Leiter

162. Nunmehr wollen wir den Fall annehmen, dass das Hinderniss *leitet*, d. h. die Wellen einem Mittel begegnen, dessen elektrische Theile nicht durch Elasticität, sondern durch Reibung mit einander verbunden sind. Offenbar wird hier nicht bloss bei der äusseren Schicht eines solchen Mittels, sondern auch bei jeder folgenden Schicht während jeder Periode der Beschleunigung eine gewisse Gleitung stattfinden, sodass die ganze einfallende Strahlung beim Eindringen in eine

Was aus der Strahlung wird

164. Um zu verstehen, was mit der Strahlung vorgeht, die auf einen leitenden Körper trifft, wollen wir zunächst den enger begrenzten Fall setzen und uns den Körper als vollkommenen Leiter denken. In einem solchen sind die Räder nicht einmal durch Reibung, sie sind überhaupt nicht verbunden. Mithin ist die Gleitung an der Begrenzung eines solchen Leiters vollkommen und es findet gar kein Verbrauch von Energie an seiner Oberfläche statt. Der leere Raum auf Fig. 38 stellt einen solchen vollkommenen Leiter dar. Aetherschwingungen, die ihn treffen, gelangen praktisch an die Grenzen ihres Mediums und können nicht darüber hinaus fortgepflanzt werden. Die letzten Zahnräder empfangen einen Anstoss, den sie nicht weitergeben können und den sie daher auf demselben Wege wieder zurücksenden, auf dem er kam: die Strahlung wird vollständig reflektirt. Der Vorgang ist ähnlich wie wenn eine Tonwelle das offene Ende einer Orgelpfeife erreicht; wie wenn ein Ton aus dem Wasser in die Luft übergeht; oder wie wenn ein Stoss, der sich durch eine Reihe miteinander verbundener Kugeln fortgepflanzt hat, bei der letzten ankommt. Nur besteht der Unterschied, dass bei diesen Longitudinalstössen die Phase sich umkehrt, während sie unter gleichen Bedingungen bei Transversalstössen gerade nicht umgekehrt wird.

Unsere massiven elastischen Räder, namentlich die Räder auf Fig. 48, können den Vorgang ganz richtig veranschaulichen.

165. Die reflektirten Stösse werden nun den direkten Stössen superponirt und interferiren mit ihnen. Wenn man daher die Entfernungen richtig anpasst, so erhält man die wohlbekannte Erscheinung der festen Schwingungsknoten und stehenden Wellen. (§ 130.)

166. Das Interessanteste aber ist, dass ein vollkommener elektrischer Leiter, wenn es einen solchen gäbe, für Licht vollständig undurchlässig sein müsste; das Licht könnte nicht durch seine äussere Oberfläche eindringen, sondern würde vollständig reflektirt werden. Die Substanz würde ein vollkommener Reflektor für Aetherwellen jeder Grösse sein.

Bei einem vollkommenen Leiter findet also ebenso wie bei einem vollkommenen Nichtleiter kein Verbrauch von Energie statt. Die einfallende Strahlung wird entweder ganz reflektirt, oder theils reflektirt, theils fortgepflanzt. Nur bei Substanzen, deren Leitungsvermögen mehr oder minder unvollkommen ist, wird ein Theil der Strahlung aufgebraucht und ihre Aetherschwingungen in Atomschwingungen, d. h. in Wärme umgesetzt.

167. Die Art, wie Strahlung oder irgend eine andere elektrische Störung mit beständigem Verlust durch einen unvollkommenen Leiter diffundirt, wird leicht verständlich, wenn wir uns wieder dem § 103 zuwenden. Die aufeinander folgenden Gleitstellen ABCD, EFGH etc.

sind aufeinander folgende Schichten inducirter Ströme. Der elektromotorische Impuls erschöpft sich bei der Erzeugung dieser Ströme, die sich, den Gesetzen der Diffusion entsprechend, immer tiefer und tiefer im Stoff bilden.

Wenn die Wellen auf einer Seite einer Platte einfallen, so wird ein gewisser Bruchtheil derselben auf der andern Seite wieder austreten; und dieser Bruchtheil wird nach dem logarithmischen oder geometrisch progressiven Abnahmegesetz von der Dicke der Platte abhängig sein. (Siehe auch XVI. Kapitel.)

KAPITEL XV

WIRKUNG ELEKTROMAGNETISCHER UND ELEKTROSTATISCHER ERSCHEINUNGEN AUF DAS LICHT

168. Wir haben nun einige Erscheinungen zu erwähnen, die lediglich von einer Veränderung des Aethers durch die benachbarte Materie abhängen und von denen wir Grund haben anzunehmen, dass sie im freien Aether überhaupt nicht vorkommen. Dies sind die optischen Phänomene von Faraday und Kerr und das elektrische Phänomen von Hall.

Faraday entdeckte, lange ehe irgend ein anderer Zusammenhang zwischen Elektricität und Licht bekannt war, dass die Schwingungsebene des Lichtes gedreht werden kann, indem man den Lichtstrahl durch gewisse magnetisirte Stoffe in der Richtung der Kraftlinien hindurchsendet. Um diese Wirkung sichtbar zu machen, muss man planpolarisirtes Licht durch ein längeres Stück der magnetisirten Substanz hindurchsenden.

Untersucht man es dann nach seinem Austritt, so zeigt sich, dass es zwar noch immer planpolarisirt ist, dass sich aber die Polarisationsebene bis um einen rechten Winkel oder noch weiter gedreht hat.

Da nun in einem magnetischen Felde eine Art rotatorischer Bewegung um die Kraftlinien stattfindet, so wäre es im Allgemeinen sehr wohl denkbar, dass Schwingungen spiralförmig gedreht würden, wenn sie in einem solchen Felde an diesen Linien entlang wandern. Dann würden sie ja in einer andern Ebene polarisirt wieder austreten. Wenn man aber diesen Vorgang ins Einzelne verfolgt, so zeigt sich, dass die Sache nicht ganz so einfach ist und auch nicht sein darf. Denn, wenn die Erscheinung lediglich auf einer magnetischen Rotationsbewegung um die Lichtstrahlen beruhte, so müsste sie auch im freien Raum und in demselben Sinne bei allen Mitteln stattfinden. Sie findet aber im freien Raum, d. h. im freien Aether, überhaupt nicht statt, und der Sinn der Drehung ist nicht für alle Mittel gleich; ja die Stoffe lassen sich in zwei Gruppen eintheilen nach dem Sinn, in welchem eine gegebene Magnetisirung die Ebene des durch sie hindurchgesandten polarisirten Lichtes dreht.

169. Aehnlich verhält es sich mit der von Kerr entdeckten elektrostatisch optischen Erscheinung. Er zeigte, dass polarisirtes Licht, welches längs der Kraftlinien durch ein elektrostatisches Feld gesandt wird, bei gewissen Mitteln elliptisch polarisirt wieder austritt.

Da sich nun ein elektrisches Feld in einem Zustande von Spannung befindet und Spannung bekanntlich durchsichtigen Körpern die Fähigkeit verleiht, schwach doppelt zu brechen, mithin in der Ebene polarisirtes Licht in elliptisch polarisirtes Licht zu verwandeln, so erscheint eine solche Wirkung des elektrischen Feldes auf den ersten Blick sehr begreiflich. Ganz so einfach ist die Sache aber auch hier nicht; sonst müsste die Wirkung eine ganz allgemeine sein und bei allen möglichen verschiedenen Mitteln in demselben Sinne, sowie im freien Raum auftreten. Statt dessen tritt sie im freien Raum überhaupt nicht und bei verschiedenen Stoffen in verschiedenem Sinne auf, sodass diese danach wiederum in zwei Gruppen eingetheilt werden können.

Zwischen der von Faraday entdeckten Drehung des Lichtes durch ein magnetisches Feld und der von Kerr entdeckten doppelten Brechung des Lichtes durch ein elektrostatisches Feld besteht also folgende Uebereinstimmung: Beide sind kleine oder Restwirkungen, die von dem Vorhandensein eines dichten oder materiellen Mittels abhängen oder je nach der Beschaffenheit desselben ihr Vorzeichen wechseln.

170. Eisen und die übrigen stark magnetischen Substanzen sind die einzigen Stoffe, in welchen das Faraday'sche Phänomen stark ausgeprägt auftritt. Die Entdeckung der Erscheinung in diesen Körpern rührt ebenfalls von Kerr her. Ihre Behandlung ist haupt-

sächlich deshalb schwierig, weil sie sehr undurchsichtig sind; es muss daher mit ausserordentlich dünnen Schichten experimentirt werden. Man kann nach Belieben das durchgehende oder das reflektirte Licht benutzen; mit reflektirtem Licht wurde aber zuerst gearbeitet. Das von der polirten Oberfläche eines Magneten zurückgestrahlte Licht dringt allerdings kaum in die Masse des Eisens ein, ehe es reflektirt wird; aber es dringt doch tief genug, um durch die gewaltige magnetische Wirbelbewegung, die es dort vorfindet, merklich gedreht zu werden.

171. Alle diese stark magnetischen Substanzen sind metallische Leiter und daher sehr undurchsichtig. Ob jedoch ein wirklicher Zusammenhang zwischen der starken Magnetisirbarkeit und dem Leitungsvermögen besteht, vermag ich nicht zu sagen. Dass aber der grössere Theil des Lichtes beim Eintritt in eine stark magnetische Substanz reflektirt wird, ist begreiflich, ja nothwendig, denn in einem solchen Mittel ist die Dichtigkeit des Aethers, μ, sehr gross und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen muss daher plötzlich ungeheuer abnehmen, ein Vorgang, der stets mit starker Reflexion verbunden ist, genau so wie wenn ein Ton aus einem Mittel in ein anderes viel dichteres übergeht.

Aber die Undurchsichtigkeit des Eisens und anderer magnetischer Substanzen lässt sich auch, wie die anderer Metalle, einfach auf ihr Leitungsvermögen zurückführen

und ihr hohes μ braucht optisch nicht merklich wirksam zu sein.

Wenn es gelänge eine nichtleitende starke magnetische Substanz zu finden, so würde sie wahrscheinlich einen sehr grossen Theil des Lichtes an ihrer Oberfläche reflektiren, obgleich sie das eingedrungene nicht verbrauchen würde. Mit einer solchen Substanz zu experimentiren würde ausserordentlich interessant sein, aber ihr Vorhandensein bedingt vielleicht eine Verbindung von unvereinbaren Eigenschaften. Jedenfalls ist sie noch nicht entdeckt worden.[1])

Der Hall-Effekt scheint mit dem Faraday'schen eng verknüpft. Es wird daher am einfachsten sein, ihn vorläufig noch ganz zu übergehen.

172. Eine allgemeine Vorstellung von dem, was bei den Phänomen von Faraday und Kerr vorgeht, erhält man auf folgende Weise:

Eine einfache Schwingung, wie die eines Pendels oder jede andere Oscillation in einer Ebene, lässt sich auf unendlich viel verschiedene Arten in zwei andere Schwingungen zerlegen, ebenso wie eine Kraft in beliebig viel Paare aequivalenter Kräfte zerlegbar ist. Am zweckmässigsten zerlegt man eine einfache Schwingung auf folgende Weisen: (1) in zwei gleich grosse Kompo-

[1]) So musste ich 1889 noch schreiben: Heute machen es die Beobachtungen von Herrn Pictet und Herrn Dewar wahrscheinlich, dass bei sehr niedrigen Temperaturen eine solche Substanz gefunden werden könnte.

nenten, die gleichfalls in einer Ebene schwingen und je 45° gegen die ursprüngliche Schwingung geneigt sind, wie wenn PQ in AB und CD zerlegt wird (Fig. 49); und (2) in zwei gleich grosse circulare oder rotatorische Schwingungen in entgegengesetzten Richtungen, wie wenn PQ in PMQ und PNQ zerlegt wird (Fig. 50). Das erste Verfahren erklärt die Erscheinung von Kerr, das zweite die Erscheinung von Faraday

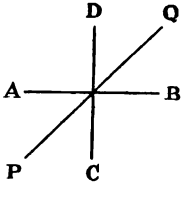


Fig. 49.

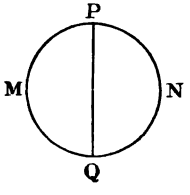


Fig. 50.

Von diesen beiden Schwingungskomponenten AB und CD, in welche wir PQ zerlegt haben, lasse man die eine aus irgend einer beliebigen Ursache der andern vorauseilen, sodass, wenn sich beide senkrecht zum Papier bewegen, die eine etwas schneller wandert als die andere. Alsdann verändert sich sofort der Charakter der Schwingung, zu der sie sich zusammensetzen. Nach der Beschleunigung werden sie nicht mehr die ursprüngliche einfache Schwingung PQ ergeben, sondern eine elliptische, oder, wenn die Beschleunigung eine Viertelschwingungsdauer beträgt, eine circulare Schwingung.

Dies sind Thatsachen, die in jedem elementaren Buche über polarisirtes Licht enthalten sind und mit Hülfe eines einfachen Pendels sehr leicht veranschaulicht werden können. Ich darf sie als bekannt voraussetzen.

Aehnlich verhält es sich mit der Zerlegung der einfachen Schwingung in zwei entgegengesetzte kreisförmige Schwingungen. Wenn sich die Komponenten mit gleicher Geschwindigkeit durch ein zwischengeschobenes Mittel bewegen, vereinigen sie sich nach dem Austritt wieder zu der ursprünglichen Schwingung in ihrer ursprünglichen Lage; bewegt sich aber die eine schneller als die andere, so vereinigen sie sich zwar zu einer Schwingung von derselben Art, diese ist aber um einen gewissen Winkel gedreht. Jeder Umstand also, der eine von zwei *rechtwinkligen* Komponenten gegen die andere verzögert, verwandelt die resultirende Schwingung aus einer ebenen in eine elliptische; während jeder Umstand, der eine von zwei *kreisförmigen* Schwingungen gegen die andere verzögert, die Art der Schwingung zwar nicht verändert, sie aber um einen gewissen Winkel dreht.

173. Soweit handelt es sich um die einfachsten Gesetze der Mechanik. Nun ist die nächste Frage, auf die wir eingehen müssen: von welchen Grössen hängt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in irgend einer Substanz ab?

Diese Werthe haben wir im § 128 bereits eingehend

erörtert und haben die Grösse der Geschwindigkeit zu

$$\frac{1}{\sqrt{(k\mu)}}$$

bestimmt. Jeder Umstand also, der die elektrische oder magnetische Permeabilität des Mittels erhöht, vermindert die Geschwindigkeit des Lichtes. Wenn nun ein Mittel bereits einer sehr starken Spannung in einer bestimmten Richtung unterworfen ist, so wäre es möglich, dass es gegen eine weitere Spannung in derselben Richtung weniger empfindlich würde und an Elasticität verlöre. Jedoch ist diese Wirkung nicht nothwendig; sie würde vielmehr nur eintreten, wenn die Spannung ganz ausserordentlich stark wäre und bereits anfinge, die Eigenschaften des Mittels dauernd zu verändern. Man hat Grund anzunehmen, dass die specifische Induktionskapacität der meisten Mittel sehr konstant, bei einigen Mitteln vielleicht vollkommen konstant ist; wenn es aber irgend eine Grenze gäbe, über die hinaus die Spannung aufhörte zu wirken, dann würde wahrscheinlich in der Nähe dieser Grenze eine Veränderung der specifischen Induktionskapacität eintreten — ob eine Zu- oder Abnahme, ist schwer zu sagen. Herr Quincke hat über diesen Gegenstand gearbeitet und nachgewiesen, dass der Werth von k durch eine starke elektrische Spannung beeinflusst wird.

Man denke sich nun ein Dielektricum, das einer ausserordentlich hohen elektrischen Spannung unterliegt,

dessen Eigenschaften also in der Richtung der Kraftlinien um ein Geringes von seinen Eigenschaften senkrecht zu dieser Richtung abweichen. Der Werth von k wird in der Richtung der Spannungslinien nicht ganz derselbe sein, wie senkrecht zu ihnen. Mithin wird sich die rechtwinklige Komponente einer Schwingung in der Richtung der Kraftlinien etwas schneller oder langsamer fortbewegen, als die Komponente senkrecht zu dieser Richtung, da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bekanntlich von k abhängig ist. Ein solches Mittel wird also sofort die Eigenschaft der Doppelbrechung erlangen und das Kerr'sche Phänomen aufweisen.

174. Aehnlich verhält es sich mit der Magnetisirung. Bekanntlich ist μ in vielen Mitteln nicht konstant. Im Eisen z. B. ist die Empfänglichkeit für sehr schwach magnetisirende Kräfte gering; sie wächst in dem Maass wie die Kräfte zunehmen; bei einer gewissen Magnetisirung erreicht sie ihren Höhepunkt, um dann wieder stetig abzunehmen. Aber sie ist nicht allein sehr veränderlich, sondern ihr Werth ist beim Abnehmen und Zunehmen der Kräfte verschieden; für entmagnetisirende Kräfte ist er anders und gewöhnlich geringer als für magnetisirende Kräfte. Diese Eigenschaft wurde speciell von Ewing erforscht, der sie „Hysterēsis" genannt hat. Substanzen mit sehr geringer Permeabilität lassen sich nicht annähernd in demselben Grade magnetisiren, daher ist diese Eigenschaft bei ihnen wenig, vielleicht garnicht bemerkt worden. Nichtsdestoweniger müssen sie in

jeder Substanz vorhanden sein, die eine Spur von permanenten Magnetismus aufweist, und alle Substanzen, mit denen ich experimentirt habe, zeigen eine solche Spur.[1])

Ein bereits sehr stark magnetisirtes Mittel wird gegen eine vermehrte Magnetisirung in derselben Richtung etwas weniger empfänglich sein, als gegen eine Magnetisirung in der entgegengesetzten Richtung. Mehr braucht es nicht, um die von Faraday beobachtete Erscheinung zu erklären. Wird die Schwingung in zwei entgegengesetzte kreisförmige Komponenten zerlegt, so muss die eine mit der Richtung der magnetischen Kraftlinien im Mittel übereinstimmen und danach streben die Magnetisirung unendlich wenig zu verstärken; während die andere Komponente im entgegengesetzten Sinne wirken wird. Der Werth von μ wird also für beide Komponenten verschieden sein; sie werden sich mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen und die Schwingungsebene wird gedreht werden.[2])

[1]) Siehe Nature 33. Band S. 484.

[2]) Der oben erörterte Zusammenhang zwischen Hysterēsis und magnetischer Drehung der Polarisationsebene ist ein Punkt, auf dem ich keineswegs bestehe. Herr Fitzgerald hat mich darauf aufmerksam gemacht, dass, sobald die ganze Wellenfläche in Betracht kommt, meine Theorie kaum Stich hält. Es sei besser, wenn die eigentliche elektromagnetische Störung dasjenige sei, auf das eingewirkt werde, statt dass man sich genöthigt sehe, eine sekundäre Wirkung der elektrostatischen Verrückung zu Hülfe zu nehmen. Herr Ewing führte zwar zuerst einige Thatsachen auf, die meine

175. Der Drehungssinn hängt davon ab, ob der Werth von μ für schwache Verminderungen oder für schwache Verstärkungen der magnetisirenden Kraft grösser ist; diamagnetische Substanzen werden sich in dieser Beziehung umgekehrt verhalten wie paramagnetische. Substanzen, deren μ bei jeder, auch der stärksten magnetischen Polarisation konstant ist, werden schwerlich Hysterēsis aufweisen; die aufsteigenden und absteigenden Magnetisirungskurven werden übereinstimmen, da beide gerade Linien sind, in einem solchen Stoff wird daher die Faraday'sche Erscheinung nicht auftreten. Ebenso werden Substanzen, deren k bei jeder elektrischen Polarisation absolut konstant ist, das Kerr'sche Phänomen nicht zeigen. Der freie Raum scheint so beschaffen zu sein und auch die Gase sind es annähernd, aber nicht ganz.

Im Eisen ist μ grösser für eine zunehmende als für eine abnehmende Kraft, wie die Schleifen in Ewing's Kurven beweisen; daher wird sich die kreisförmige Komponente, deren Richtung mit dem magnetisirenden Strom übereinstimmt, langsamer bewegen, als die andere

Ansicht zu bestätigen schienen, zweifelt aber jetzt daran, dass die kinematische Zerlegung einer Verrückung in zwei kreisförmige Komponenten unter den Umständen zulässig ist. Auch ich hege Zweifel. Wüsste ich bestimmt, dass mein Gedanke nicht das geringste Körnchen Wahrheit enthält, so würde ich ihn selbstverständlich unterdrücken; da ich aber hiervon nicht überzeugt bin, so lasse ich ihn vorläufig stehen und mache ihn nur durch diese Anmerkung unschädlich. Siehe auch §§ 180ff.

Komponente. Die Drehung wird sich also im Eisen gegen die Richtung des magnetisirenden Stromes vollziehen. Dasselbe gilt anscheinend von den meisten paramagnetischen Stoffen und das entgegengesetzte von den meisten diamagnetischen Stoffen; aber die blosse Thatsache des Para- oder Diamagnetismus genügt nicht, um daraus auf den Sinn der Drehung in irgend einer gegebenen Substanz zu schliessen. Man muss zuvor wissen, auf welche Weise die zunehmende oder abnehmende Magnetisirung ihre Permeabilität verändert.

Vorschlag zu einer Methode, das Faraday'sche Phänomen elektrisch nachzuweisen

176. Soweit haben wir uns nur mit der optischen Beobachtung der durch ein Magnetfeld hervorgebrachten Drehung der elektrischen Verrückung beschäftigt. Die Verrückungen waren solche, die für Lichtwellen in Betracht kommen, und die Drehung wurde durch einen analysirenden Polarisationsapparat nachgewiesen, der geeignet war, die Richtung der Schwingungen vor und nach dem Durchgang des Lichts durch eine magnetisirte Substanz festzustellen. Diese Methode ist bis jetzt die einzige, nach welcher die Erscheinung in durchsichtigen Körpern beobachtet worden ist. Aber man sollte sich nicht auf das optische Verfahren beschränken.

Elektrische Verrückungen lassen sich in jedem Isolator leicht herstellen. Wird dieser alsdann in ein stark magnetisches Feld eingeführt, sodass die elektrischen und magnetischen Kraftlinien rechtwinklig zu einander verlaufen, so müsste jede elektrische Störung eine kleine Drehung erleiden. Konstante Spannungen werden dieser Wirkung nicht unterworfen sein, sondern nur der veränderliche Zustand. Aber jede neue elektrische Verrückung müsste schwach gedreht werden, ganz wie die Verrückungen, die beim Licht in Betracht kommen.

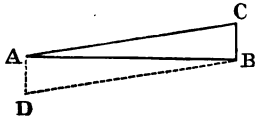


Fig. 51.

Um nun eine Verrückung AB in die Lage AC zu drehen, muss damit eine senkrechte Verrückung BC verbunden sein (Fig. 51). Die Wirkung eines magnetischen Feldes auf eine elektrische Verrückung AB besteht also in der Erzeugung einer kleinen, senkrechten, elektromotorischen Kraft BC, die mit der ursprünglichen zusammen die resultirende Wirkung AC ausmacht.

Die Wirkung ist eine vorübergehende. Sie dauert nur so lange, wie die Verrückung entsteht, und hört auf, sobald die Spannung konstant wird.

Dasselbe magnetische Feld erzeugt eine umgekehrte

elektromotorische Kraft, sobald die Verrückung umgekehrt wird. Wenn man also eine dauernde elektrische Oscillation zwischen A und B in einem magnetischen Felde aufrecht erhält, so wird sie von einer ausserordentlich schwachen transversalen Oscillation begleitet sein, die elektrisch nachgewiesen werden könnte.

Zu letzterem Zweck könnte man sich einer ähnlichen Vorrichtung bedienen, wie der auf Fig. 52 abgebildeten. Ein Würfel aus schwerem Glas ist von vier

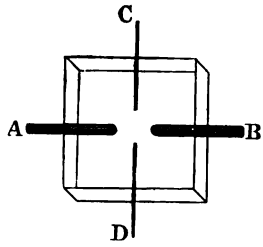


Fig. 52.

Seiten nach der Mitte zu angebohrt und mit Elektroden versehen. Das eine Paar Elektroden A B ist mit den Polen einer Wechselstrommaschine verbunden, das andere Paar C D mit einem Telephon oder einem andern, zur Wahrnehmung sehr schwacher oscillatorischer Wirkungen geeigneten Apparat. Lässt man nun ein sehr starkes konstantes magnetisches Feld auf den Würfel einwirken, indem man ihn zwischen die Pole eines starken Magneten bringt, so müsste das Telephon auf die Trans-

versalschwingungen schwach reagiren. Diese Wirkung ist experimentell noch nicht beobachtet worden, obgleich ich den angebohrten Glaswürfel dazu schon längere Zeit bereit halte; doch scheint sie mir eine nothwendige Folge der Faraday'schen Drehung der Polarisationsebene des Lichtes zu sein.

Der Hall-Effekt

177. Obgleich diese transversale elektromotorische Kraft, die das Magnetfeld in Substanzen erregt, welche veränderlichen elektrischen Verrückungen unterworfen sind, bis jetzt nur optisch in durchlässigen Körpern, d. h. in Isolatoren nachgewiesen ist, so hat man doch in Leitern die entsprechende Wirkung bei konstantem Strom elektrisch deutlich wahrgenommen. Viele hatten vergeblich danach gesucht (unter anderm Herr Carey Foster und der Verfasser, die leider nicht hinreichend auf ihre ausserordentliche Kleinheit vorbereitet waren); Herr Hall in Baltimore war der erste, der sie wirklich beobachtete.

In Leitern liegt es nahe, statt des Verrückungsstroms einen Leitungsstrom zu benutzen. Man erzeugt in einem Quadrat oder Kreuz aus Goldblatt oder einem andern dünnen Metallblech zwischen den Elektroden A B einen konstanten Strom; alsdann entsteht eine minimale transversale elektromotorische Kraft, welche

einen sehr schwachen konstanten Strom in einem mit den Endungen CD verbundenen Galvanometer erzeugt, sobald ein starkes magnetisches Feld in senkrechter Richtung auf die Platte wirkt. Fig. 53 veranschaulicht die Anordnung hinreichend. Von den Polen des Magneten befindet sich der eine über, der andere unter dem Blatt.

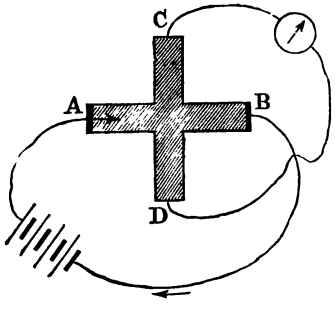


Fig. 53. — Die Richtung der transversalen elektromotorischen Kraft, welche durch das senkrechte Magnetfeld der Erde in diesem Leiter erzeugt wird, wenn er in der angegebenen Weise einen Strom befördert, ist für Gold CD, für Eisen DC.

Im Eisen lässt sich die Richtung der transversalen elektromotorischen Kraft leicht vorausbestimmen. Wie wir gesehen haben (§ 175), wird eine Verrückung im Eisen gegen den magnetisirenden Strom gedreht; um also eine Verrückung AB in die Lage AC (Fig. 51) zu drehen, muss der magnetisirende Strom im Eisen im Sinne des Uhrzeigers fliessen. Ein solcher Strom, oder (was dasselbe ist) ein Südpol unter und ein Nordpol über dem Blatt, erregt in dem Kreuz auf Fig. 53

eine elektromotorische Kraft in der Richtung DC; und diese Richtung ist nach Ampère's Gesetz gerade diejenige, in welcher der Leiter selbst durch die auf die stromleitende Substanz einwirkenden magnetischen Kräfte gedrängt wird. Die meisten diamagnetischen Substanzen müssten eine transversale elektromotorische Kraft im entgegengesetzten Sinne aufweisen. Diese durch ein magnetisches Feld in strombefördernden Leitern erregte transversale elektromotorische Kraft trägt den Namen ihres Entdeckers Hall. Sie ist, wie Herr Rowland und andere nachgewiesen haben, nahe verwandt mit der von Faraday entdeckten Drehung des Lichts.

178. Leider ist ein einfacher reiner Hall-Effekt sehr schwer zu beobachten. Der Magnetismus beeinflusst das Leitungsvermögen der Metalle in ziemlich komplicirter Weise, und Spannungen afficiren ihre thermo-elektrischen Eigenschaften. Nun muss ein Metall, das einen Strom in einem magnetischen Felde befördert, unfehlbar stärkeren oder schwächeren Spannungen durch mechanische Kräfte unterliegen; es entsteht daher eine Art Peltier-Phänomen, d. h. eine ungleiche Wärmeentwicklung an verschiedenen Stellen des Leiters; dadurch verändert sich streckenweise der Widerstand und es tritt eine Störung der Strömung ein, durch welche leicht eine transversale elektromotorische Kraft erzeugt werden kann, wie Herr Shelford Bidwell nachgewiesen hat.

Der direkte Einfluss des Magnetismus auf das Leitungsvermögen mag in vielen Metallen verhältnissmässig

gering und daher zu vernachlässigen sein, im Bismuth aber ist er jedenfalls beträchtlich. Beide täuschende Wirkungen sind im Bismuth sehr ausgeprägt, sodass sie wahrscheinlich den echten Hall-Effekt vollständig überdecken, sofern dieser überhaupt darin vorkommt. Auf alle Fälle erschweren sie es dem Beobachter, die Grösse und das Vorzeichen der eigentlichen Rotationswirkung mit Sicherheit festzustellen.

179. Aber mit welchem Recht, könnte man fragen, unterscheiden wir zwischen echten und unechten Hall-Effekten? Wenn eine transversale elektromotorische Kraft sowohl auf Grund bekannter Spannungen und thermo-elektrischer Eigenschaften als auf Grund der Rotation von Lichtwirkungen vorausgesetzt werden kann, warum halten wir diese beiden Wirkungen für verschieden? Warum sollten sie nicht verschiedene Anschauungsweisen ein und derselben Erscheinung sein?

Mit andern Worten, könnte man nicht die Faradaysche Drehung des Lichts auf minimale vorübergehende Spannungen und Temperaturerhöhungen in dem Mittel zurückführen, die dadurch verursacht würden, dass winzige elektrische Verrückungen in einem stark erregten magnetischen Felde stattfänden? Liesse sich nicht auch die von Hall beobachtete Wirkung durch den Einfluss des Magnetismus auf thermo-elektrische Eigenschaften erklären? Diese Fragen könnten dadurch beantwortet werden, dass man die Menge und Richtung der hierzu [illegible]erlichen Wirkungen quantitativ feststellte und dann

mit denjenigen vergliche, die wirklich beobachtet werden. Vorläufig fehlt es, meines Wissens, noch an hinreichenden Daten, um sie zu beantworten. Sollte dereinst die Antwort bejahend lauten, dann werden sich mehrere anscheinend unabhängige Erscheinungen als verwandt erweisen.

Mögliche Erklärungen der von Faraday und Hall beobachteten Erscheinungen

180. Wie oben gesagt wurde, hält man die von Faraday beobachtete Drehung der Polarisationsebene in durchsichtigen Körpern für eng verknüpft mit der von Hall beobachteten Erscheinung in Leitern; denn das Drehen einer Verrückung ist aequivalent ihrer Zusammensetzung mit einer kleinen zu ihr senkrechten Verrückung; und gerade jene durch ein magnetisches Feld erzeugte und senkrecht zu der bereits vorhandenen auftretende transversale elektromotorische Kraft war es, die Hall entdeckte. Nichtsdestoweniger sprechen einige Thatsachen gegen diesen einfachen Zusammenhang zwischen beiden Erscheinungen, vor allen Dingen das eigenthümliche Verhalten von Nickel, welches Licht in einem Sinne und elektrische Verrückungen im andern Sinne dreht. Eine Zeit lang durfte man noch hoffen, diese Anomalie mit Hülfe des üblichen, bequemen Auskunftsmittels, der „Unreinheit" des Metalls,

zu erklären. Seit aber beide Versuche an ein und demselben Stück vorgenommen worden sind und das Ergebniss trotzdem entgegengesetzt lautet, ist dieser Ausweg verschlossen.

In dieser Unentschiedenheit befindet sich, soviel ich weiss, auch gegenwärtig noch die Frage nach dem Zusammenhange zwischen der magnetichen Drehung des Lichts und dem Hall-Effekt.

181. An dieser Stelle möchte ich die in der Anmerkung zum § 174 ausgesprochene Warnung wiederholen, man wolle sich nicht unbedingt auf die dort versuchte Erklärung der Drehung des Lichts und des Hall-Effekts verlassen. Wenn sie richtig ist, so verknüpft sie allerdings diese Erscheinungen sehr bequem mit der Hysterēsis. Jedenfalls giebt sie die Richtung der Erscheinung im Eisen richtig an — nämlich eine dem magnetisirenden Strom entgegengesetzte Drehung. (§ 177.)

Herr Ewing hat mich seitdem darauf aufmerksam gemacht, dass, wie sich bei einer eingehenden Betrachtung seiner Kurven herausstellt, der Unterschied im Werth von μ für positive und negative magnetisirende Kräfte nur während einer Anzahl von Kreisläufen besteht, so lange die veränderlichen Stadien dauern, und aufhört, sobald ein konstanter Zustand eingetreten ist. Demnach würde die magnetische Rotation des Lichts eine Funktion der Zeit sein. Auch zeigten gewisse Versuche von Villari, bei denen eine Glasscheibe

zwischen den Polen eines Magneten rotirte, sodass immer neue Theile des Glases dem Magnetfelde ausgesetzt wurden, eine deutliche Abnahme der Drehung, sobald grosse Geschwindigkeiten erzielt wurden. Hieraus schien hervorzugehen, dass die Erscheinung eine gewisse Zeit braucht, um zu entstehen. Herr A. H. Ward führt jedoch dieses Ergebniss auf Spannungen durch Centrifugalkraft zurück, und neuere Versuche lassen es fraglich erscheinen, ob die Faraday'sche Drehung des Lichts eine messbare Zeit erfordert. [1])

182. Es sei hier auch eine scheinbar ganz abweichende Erklärung angedeutet, welche die Erscheinung mit der Thermo-Elektricität in Zusammenhang bringt.

Im § 63 suchten wir die Thomson'sche Kontaktkraft in Metallen zu erklären, indem wir annahmen, dass gewisse Substanzen mit der einen Elektricitätsgattung enger verknüpft sind, als mit der andern. So scheint z. B. Eisen die Fähigkeit zu besitzen, positive Elektricität fester zu halten als negative, während Kupfer umgekehrt die negative fester zu halten scheint als die positive. Sämmtliche Metalle lassen sich in eine oder die andere dieser beiden Klassen einreihen, mit Ausnahme von Blei, das anscheinend beide Elektricitäten gleich festhält. Diese Erscheinung ist dieselbe, welche ursprünglich von Sir W. Thomson als die „specifische Wärme der Elektricität in einer Substanz" bezeichnet wurde. Sicher ist,

[1]) Siehe einen Artikel des Verfassers im Phil. Mag. vom April 1889. Siehe auch den Vortrag über die Leydener Flasche, unten.

dass schwingende Eisenatome die positive Elektricität aus den rascher schwingenden in die langsamer schwingenden Theile — d. h. aus der Wärme in die Kälte — befördern, und dass eine ganze Gruppe von Metallen sich ebenso verhält; während eine andere Gruppe, wie Kupfer, die positive Elektricität aus der Kälte in die Wärme befördert.

Denkt man sich diese Wirkung als eine direkte Folge des Ohm'schen Gesetzes (§ 60), verbunden mit einer besonderen Beziehung gewisser Substanzen zu einer der beiden Elektricitätsgattungen, einer Beziehung, die sich auch auf andere Art äussern kann, so erhält man eine zwar ziemlich unklare aber doch mögliche Vorstellung davon, wie die Faraday'sche Drehung zu Stande kommen könnte. Man muss annehmen, dass die Ampère'schen Molekularströme in diesen Substanzen nicht aus zwei genau gleichen positiven und negativen Strömen bestehen, sondern, dass die beiden Ströme etwas verschieden sind; so könnte z. B. der positive Bestandtheil des gebundenen Aethers einer Substanz etwas dichter sein, als der negative. Alsdann würde sich der gebundene Aether in einer magnetisirten Molekel im Ganzen langsam in einer oder der andern Richtung drehen, mit einer Geschwindigkeit, die der resultirenden Rotation seiner Bestandtheile gleich ist. Denkt man sich nun, dass im Eisen der positive Ampère'sche Strom der schwächere ist, dann wird der Aether als Ganzes mit dem negativen Strom rotiren; mithin wird eine Aether-

schwingung, die in ein solches Mittel eintritt, sich in einem dem magnetisirenden Strom entgegengesetzten Sinne drehen, während sie in Kupfer und andern derartigen Stoffen in dem andern Sinne gedreht werden wird.

183. Nach dieser Theorie (deren Unklarheit ich zugebe) müsste Blei gar keine drehende Wirkung ausüben, also natürlich auch keinen Hall-Effekt aufweisen. Ferner müssten die Gruppen, in welche die Metalle nach dem Vorzeichen ihres Hall-Effekts zerfallen, mit denjenigen Gruppen übereinstimmen, in welche sie nach dem Vorzeichen ihres Thomson-Effekts eingetheilt werden können.

Von den Metallen, die Hall untersucht hat, gehören Eisen, Kobalt und Zink zu einer Gruppe; Gold, Silber, Zinn, Kupfer, Messing, Platin, Nickel, Aluminium und Magnesium zu der andern. Wenn wir nun die Ergebnisse der thermo-elektrischen Untersuchungen von Herrn Tait betrachten, so zeigt sich, dass der Thomsonkoefficient von Eisen, Kobalt, Platin und Magnesium ein negatives Vorzeichen hat, d. h. die Kurven ihres thermoelektrischen Diagramms sind absteigend; während Gold, Silber, Zinn, Kupfer, Aluminium und Zink eine aufsteigende Kurve haben; das Vorzeichen ihrer „specifischen Wärme der Elektricität" ist also positiv.

Die nicht harmonirenden Metalle sind demnach Zink, Platin und Magnesium. Unter solchen Umständen pflegt man gewöhnlich die bei den sehr verschiedenen

Versuchen angewandten Metalle für unrein zu erklären. Unrein waren sie jedenfalls; allein es widerstrebt mir, einer an und für sich so wenig haltbaren Theorie mit dieser billigen Ausflucht aufzuhelfen.

Im Philosophical Magazine vom Mai 1885 theilt Herr Hall noch weitere Messungen mit, nach denen der Effekt im Bismuth ganz ausserordentlich stark ist und in demselben Sinne stattfindet wie im Kupfer, während ein gleichfalls starker Effekt im Antimon sich im selben Sinne vollzieht wie im Eisen. Alle diese Thatsachen deuten auf irgend einen thermo-elektrischen Zusammenhang, sei es nun der von mir angedeutete oder ein anderer.

Andere ungelöste Probleme

184. Ungelöste Probleme drängen sich von allen Seiten auf, und wenn ich einzelne besonders hervorhebe, so geschieht dies nur, weil ich entweder selbst in der Richtung gearbeitet habe, oder weil meine Aufmerksamkeit anderweitig darauf gelenkt worden ist, oder weil sie an andern Stellen meines Buches keine besondere Erwähnung gefunden haben.

Wenden wir uns zum § 66 am Schluss des II. Theils, „der Strom als fortbewegte Ladung", so liegt die Frage nahe: Ist diese Bewegung absolut, oder soll sie nur relativ zum Aether gedacht werden, oder soll sie relativ

zum anzeigenden Magnetometer sein? Mit andern Worten, wenn ein geladener Körper und eine Magnetnadel zusammen durch den Raum fliegen, etwa in Folge der Bewegung der Erde um die Sonne, wird die Magnetnadel eine Ablenkung erleiden?

Es gehört dies in die Reihe jener Probleme, die mit dem Aether und seiner Bewegung in der Nähe grober Materie zusammenhängen und auf welche der Versuch von Fizeau das erste Licht geworfen hat (er wies nach, dass ein variabler Theil des Aethers mit der Materie gebunden ist und mit ihr übertragen wird, während ein anderer konstanter Theil sich frei hindurch bewegt); jener Aberrationsprobleme, welche das Genie Sir G. G. Stokes beschäftigten; der Probleme ferner, die sich auf die Bewegung des Aethers in der Nähe grosser Stoffmassen beziehen, wie sie gegenwärtig durch Herrn Michelson mit grossem Geschick experimentell angegriffen werden. Hierher wird man wahrscheinlich auch die Frage verweisen müssen, ob die absolute oder die relative Bewegung elektrischer Ladungen bei der Erzeugung eines Magnetfeldes betheiligt ist, und was eigentlich unter absoluter Bewegung durch den Aether zu verstehen ist. Der Gegenstand ist ohne Frage der experimentellen Behandlung zugänglich, aber die Versuche werden schwierig sein. Herr Ayrton hat meines Wissens einen derselben auszuführen versucht.

185. Kommen wir auf die §§ 7, 39, 41, 48, 88, 89, 97, 98, 109, 122, 134 im I, II, III Theil zurück, so finden

wir, dass eine ganze Reihe von Fragen in Betreff der lebendigen Kraft unbeantwortet geblieben sind. Besitzt der elektrische Strom wirkliches, mechanisch nachweisbares Beharrungsvermögen? Wir können diese Frage nicht eher verneinen, als bis wir sie von einer Reihe verschiedener Gesichtspunkte aus beleuchtet haben. Zu diesem Zweck müssen wir sie in zwei Hauptpunkte zerlegen: (1) Verhält sich bei konstantem Strom ein Magnet wie ein Gyrostat? (2) findet bei veränderlichem Strom ein schwacher mechanischer Rückstoss statt, wenn der Strom geschlossen oder unterbrochen wird? Jeder dieser Hauptpunkte zerfällt dann wieder in vier oder mehrere Unterabtheilungen, je nachdem es sich um (a) metallische Leiter, (b) um Elektrolyte, (c) um Gase, (d) um Dielektrica handelt.

Angenommen, dass die Antwort für Metalle verneinend lautete, so würde dies für Elektrolyte noch keineswegs massgebend sein. Ja, da bei elektrolytischer Leitung die Materie mit dem Strom wandert (§ 36), so muss eigentlich etwas Beharrungsvermögen vorhanden sein, wenn es auch zu gering ist, um wahrgenommen zu werden — sei es nun ein Rückstoss des ganzen Gefässes beim Schliessen und Unterbrechen, oder ein beständiger Druck gegen die Elektrode, auf der sich der Niederschlag bildet. Der Verfasser hat nach beidem gesucht, aber nachdem eine Reihe störender Wirkungen beseitigt worden war, mit bisher negativem Erfolg. In einer Federpose, die

an dem Arm einer Torsionswage aufgehängt war, bestand die Hauptstörung darin, dass Temperaturschwankungen entstanden, welche allmählich eine winzige Luftblase erzeugten und diese hin- und hertrieben, wodurch die gesuchte Erscheinung täuschend nachgeahmt wurde. Wenn man eine Elektrode aufhängt, so entstehen durch Unterschiede der Koncentration Störungen in dem Elektrolyten, die gleichfalls jede etwa vorhandene Wirkung überdecken.

Eine naheliegende aber höchst unbequeme Störungsquelle ist die unmittelbare Einwirkung des Erdmagnetismus auf den Stromkreis. Um diese zu überwinden, brachte ich nicht bloss die von meinen Stromkreisen umflossene Fläche möglichst auf Null, sondern ich umschloss die Stromkreise auch mit dem Eisenmantel eines Thomson'schen Marine-Galvanometers.

Der Versuch von Herrn Crookes, bei dem ein elektrischer Strom im Innern einer luftleeren Röhre ein Rädchen auf Schienen fortbewegt — vielleicht sogar der uralte Versuch mit dem von einer Spitze ausgehenden Wind — beweisen, dass die lebendige Kraft dem elektrischen Strom in Gasen jedenfalls nicht fehlt. (§ 64.)

Um mich davon zu überzeugen, ob die Veränderung elektrischer Verrückungen in Dielektricis von Wirkungen des Beharrungsvermögens begleitet sei, hängte ich einen Glimmerkondensator am Ende des Arms einer Torsionswage derart auf, dass er an Ort und Stelle geladen und entladen werden konnte. Ich beobachtete viele

täuschende Wirkungen, aber keine wirklich zuverlässige.

Der Gegenstand ist meiner Ansicht nach noch keineswegs erschöpft, und ich erwähne nur meine alten Versuche, um künftigen Experimentatoren einen eventuellen Anhalt zu geben.

186. Ein anderes Problem betrifft die Einwirkung des Lichtes auf das Leitungsvermögen. Ausgeglühtes Selen und vielleicht noch einige andere Substanzen leiten ausserordentlich viel besser, wenn sie belichtet werden. Die Ursache dieser Erscheinung ist bis jetzt unbekannt; ob sie eine Eigenschaft der Materie überhaupt ist, die Metalle und andere Körper in geringem Grade besitzen, weiss man nicht bestimmt, da die Versuche von Herrn Börnstein, deren Ergebniss für Metalle bejahend lautete, von der Kritik beanstandet worden sind.

Sollten Metalle keine derartige Erscheinung aufweisen, so könnte sie immerhin bei Elektrolyten vorkommen; jedoch ist sie auch hier, wenn überhaupt vorhanden, unbedeutend und namentlich nur schwer von der ganz ähnlichen Wirkung blosser absorbirter Strahlung oder Wärme zu unterscheiden.

Ich habe festgestellt, dass ein Reagenzgläschen, das sich in siedendem Wasser befand, sichtlich besser leitete, wenn die Fensterladen offen, als wenn sie geschlossen waren, obgleich nur diffuses Tageslicht darauf fiel. Da aber diese Wirkung auch durch eine Temperaturerhöhung

von $^1/_{10}$ Grad entstanden sein konnte und da die Absorption des diffusen Tageslichts hinreicht, um eine solche Temperaturerhöhung in der Kugel eines Thermometers zu verursachen, selbst wenn sie sich in siedendem Wasser befindet, so bin ich genöthigt, das Ergebniss, so klar und deutlich es ist, für negativ anzusehen und habe es nicht veröffentlicht.

187. Der Umstand, dass die ultravioletten Strahlen dieselbe Schwingungsperiode haben wie die wahrscheinlich in den Molekeln vorhandenen elektrischen Schwingungen (§ 157), scheint von allerhand Folgen begleitet zu sein, auf die man jetzt aufmerksam zu werden anfängt.

So fand Hertz, dass das Licht eines Funkens von Weitem auf einen andern Funken einwirkt, in der Weise, dass die zu überspringende Strecke durch die Belichtung virtuell verkürzt wird. Die Herren Wiedemann und Ebert untersuchten die Erscheinung genauer und erhielten mehrere interessante Resultate, aus denen deutlich hervorging, dass diese Wirkung von den ultravioletten Strahlen ausgeht. Herr Hallwachs entdeckte, dass eine reine Metallscheibe elektrisch wird, wenn Licht darauf fällt. Und so giebt es noch eine Reihe ähnlicher, theils längst bekannter, theils erst kürzlich beobachteter Thatsachen, die sämmtlich die molekulare Wirksamkeit des Lichts veranschaulichen. Wahrscheinlich beruhen sie alle auf irgend einer synchronen Störung in der freien Luftschicht, welche die Oberfläche

der Körper unmittelbar berührt, einer Störung, die eine Art chemischer Wirkung hervorbringt. Deshalb gehören wohl auch diese physikalischen Wirkungen in dieselbe Gruppe wohlbekannter aber noch unklar verstandener Thatsachen, die wir unter der Bezeichnung chemische oder actinische Wirksamkeit des Lichtes zusammenfassen. Denn dass das Licht auf Silbersalze, Hartgummi, Wasserstoff und Chlor etc. einwirkt, ist eine alte Erfahrung. Wahrscheinlich werden wir nun bald über die Art dieses Vorganges nähere Aufschlüsse erlangen. (§ 33.)

188. Noch vor wenigen Monaten würde ich der Erzeugung elektrischer Strahlen von mässiger Wellenlänge und ihrer Verwendung zu allen üblichen optischen Versuchen — der Reflexion, Refraction, Interferenz, Diffraction, Polarisation, magnetischen Rotation u. s. w. — unter den ungelösten Problemen einen hervorragenden Platz angewiesen haben. Heute aber ist ein grosser Theil dieser Aufgaben gelöst und muss daher in einem besonneren Schlussabschnitt behandelt werden.

Schluss

Freilich ist nichts weniger am Platze als das Wort „Schluss" in diesem Augenblick, da der ganze Gegenstand von Leben pulsirt, da jeder Monat neue Gesichtspunkte zu erschliessen scheint und dunkel geahnte

Wahrheiten in helleres Licht rückt. Wir können heute ein Buch über Elektricität nur schliessen, indem wir die neuesten Entdeckungen freudig begrüssen und den Geist unserer Leser auf die noch bevorstehenden vorbereiten.

189. Im XIV. Kapitel §§ 1 und 8 und im ganzen IV. Theil sprachen wir zuversichtlich von einer Strahlung, die durch elektrische Schwingungen erregt wird, sich mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzt wie das Licht, nach denselben Gesetzen reflektirt und gebrochen wird und in der That mit der auf unsere Netzhaut einwirkenden Strahlung vollkommen identisch ist, bis auf ihre Wellenlänge. Diese Strahlung ist nunmehr von Heinrich Hertz in Karlsruhe, nachmaligem Professor in Bonn, definitiv nachgewiesen und beobachtet worden. Ein Bericht über diese Entdeckung wurde im December des Jahres 1888 durch Hermann von Helmholtz der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin mitgetheilt.

Der Schritt, der es Hertz ermöglichte, mit Leichtigkeit zu erreichen, was Andere vor ihm vergeblich erstrebt hatten, bestand in der Erfindung eines geeigneten empfangenden Apparates. Wenn Licht auf einen Leiter fällt, so erzeugt es zunächst elektrische Ströme und dann Wärme. Diese schwache Sekundärwirkung war es, die wir zu finden gehofft hatten. Hertz aber fasste muthig den Stier bei den Hörnern, suchte nach der direkten elektrischen Wirkung und sie offenbarte sich

ihm in der herrlich einfachen Gestalt von mikroskopischen Funken, die auf der Funkenstrecke zwischen zwei Leitern oder zwischen den Endungen eines kreisförmigen Leiters auftreten.

Er nahm einen Messingcylinder von 3 cm Durchmesser und 36 cm Länge, der in der Mitte seiner Länge von einer kurzen Funkenstrecke durchbrochen war, und verband die beiden Hälften mit den Endungen einer kleinen Induktionsspule; jeder Funken versetzte die Ladung des Cylinders in Schwingungen von ungefähr 500 Mill. in der Sekunde und ertheilte dadurch dem Aether, in genau derselben Weise wie ein divergirender Strahl polarisirten Lichts, Wellen, die ungefähr 3 mal so lang waren wie der Cylinder.

Die so ausgesandte Strahlung liess sich durch ebene leitende Flächen reflektiren und durch metallische parabolische Hohlspiegel koncentriren. Der Spiegel, dessen Hertz sich gewöhnlich hierfür bediente, war ein grosser parabolischer Cylinder aus Zinkblech, in dessen Brennlinie der elektrische Oscillator sich befand. Bei dieser Anordnung war die Wirkung der Welle auf ziemlich weite Abstände wahrnehmbar. Der empfangende Apparat (Resonator) bestand aus zwei synchron gemachten gradlinigen Leitern, die durch eine mikroskopische Funkenstrecke unterbrochen waren; auf dieser erschienen die sekundären, inducirten Funken. Vermittelst eines zweiten dem ersten genau gleichen Hohlspiegels, der die parallelen Strahlen auffing und in eine

Brennlinie wieder vereinigte, war die Wirkung auf eine Entfernung von 16 m wahrnehmbar. Drehte man den empfangenden Spiegel um einen rechten Winkel aus seiner Lage, so verlor er die Fähigkeit, auf dieses specielle Licht konvergirend einzuwirken.

Oeffnungen in einer Reihe zwischengeschobener Schirme bewiesen, dass sich die Strahlung (im grossen Ganzen) gradlinig ausbreitet.

Ein Gitter aus Metalldraht lässt die Wellen hindurch, wenn die Drähte senkrecht zu den elektrischen Oscillationen angeordnet sind; dagegen reflektirt es sie, wenn es um einen rechten Winkel gedreht wird, sodass die Drähte den Oscillationen parallel sind; es stellt also einen Analysator dar, der das Vorhandensein von polarisirtem Licht nachweist. Der empfangende Spiegel diente gleichfalls als Analysator, denn, wenn er stark gedreht wurde, hörte er auf, die Störung zu empfinden.

Leitende Metallschirme, selbst dünne Schichten, erwiesen sich als sehr undurchlässig gegen elektrische Strahlung; dagegen störten nichtleitende Stoffe, sogar Holzwände, fast gar nicht; ja, Hertz bemerkt, „nicht ohne Verwunderung," dass die Thür zwischen der Strahlungsquelle und dem empfangenden Spiegel geschlossen sein konnte, ohne die Verbindung zu unterbrechen, oder das Auftreten der sekundären Funken zu beeinträchtigen.

Aber den sichersten Beweis, der bis jetzt erbracht worden ist, lieferte der Brechungsversuch. Es wurde

ein grosses Prisma aus Hartpech hergestellt, dessen Grundfläche 1, 2 Quadratmeter und dessen brechender Winkel nahezu 30 ° betrug. Brachte man dieses Prisma in die Bahn der elektrischen Strahlung, so entging sie dem empfangenden Hohlspiegel, wenn er nicht um einen bedeutenden Winkel aus seiner Lage gedreht wurde. Drehte man ihn so lange, bis die Intensität der Funken ihr Maximum erreichte, so ergab sich, dass die Strahlen durch das Pechprisma bei symmetrischer Anordnung ungefähr 22 ° aus ihrer normalen Bahn abgelenkt worden waren, dass also der Brechungsindex von Pech für diese 60 cm langen Wellen etwa 1,7 betrug.

190. Dies sind grosse Versuche. Als die erste Auflage dieses Buches entstand, waren die letzten erst seit wenigen Monaten bekannt. Auch jetzt haben wir es mit blossen Anfängen zu thun. Die meisten dieser Versuche sind einfach und waren schon damals wiederholt worden.[1]) Durch sie werden sich voraussichtlich manche zweifelhafte Punkte entscheiden. In der Optik bestand z. B. schon fast seit Beginn des Jahrhunderts die Streitfrage, ob sich die Schwingungen in der Polarisationsebene oder senkrecht zu ihr vollziehen; mit anderen Worten, ob sich bei dichten Mitteln die Elasticität oder die Dichtigkeit des Aethers verändert; oder, um mich

[1]) Siehe Fitzgerald und Trouton, Nature, 39. Band S. 391; auch Dr. Dragoumis, ebenda S. 548. Auch Lodge und Howard, welche die Strahlung durch eine zweckmässige Linse koncentrirt haben, Phil. Mag. Juli 1889.

im Sinn der Maxwell'schen Theorie auszudrücken, ob die elektromagnetische oder die elektrostatische Störung mit der Polarisationsebene übereinstimmt. Aussergewöhnlicher Scharfsinn hatte diese Frage bereits vermittelst der üblichen optischen Versuche nahezu gelöst; jetzt aber, wo wir im Stande sind, mit Hülfe der Elektricität die Strahlung willkürlich hervorzurufen, wo wir über die Richtung ihrer Schwingungen und ihr ganzes Wesen genau unterrichtet sind, dürfen wir hoffen, dass uns die endgültige Lösung dieser und mancher anderer spröder optischer Probleme im Laufe des nächsten Jahrzehnts mühelos in den Schooss fallen wird. (Siehe Seite 394.)

Wir sind jetzt im Besitz einer wirklichen Wellentheorie des Lichts, die nicht mehr auf der blossen Analogie mit dem Schall aufgebaut ist; ihr Entstehen und Wachsen aber gehört zu den gewaltigsten Errungenschaften der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts.

Im Jahre 1865 veröffentlichte Maxwell seine Theorie des Lichts. Vor Schluss des Jahres 1888 hat sie sich auf das Erschöpfendste bestätigt. Ihre weitere Entwickelung ist nur eine Frage der Zeit, der Ausdauer und der Geschicklichkeit. Das ganze Gebiet der Optik gehört nunmehr der Elektricität, die auf diese Weise zu einer herrschenden Wissenschaft geworden ist.

KAPITEL XVI

NEUESTE FORTSCHRITTE

191. Soweit gelangten wir in der ersten Auflage. Seit ihrem Erscheinen ist soviel über die Hertz'schen Versuche und ihre Folgen geschrieben worden, dass ein kurzer Bericht über die hauptsächlichsten, ihnen zu Grunde liegenden Gedanken hier am Platze sein dürfte.

Diejenige Entdeckung von Hertz, welche ihm alle übrigen ermöglichte, war die Beobachtung, dass in passend angeordneten Leitern Funken auftreten, wenn man sie der elektrischen Strahlung eines hinreichend raschen Wechselstroms aussetzt. Dass die Entladung der Leydener Flasche oscillirend ist, wurde bereits im § 19 und § 124 erörtert; die einfachste Methode, um die funkenerregende Kraft der elektrischen Strahlung zu veranschaulichen, ist das von mir nebst nebenstehendem Diagramm (Fig. 54) in der Nature vom 20. Februar 1890 mitgetheilte Verfahren.

Zwei gleiche Leydener Flaschen A und B werden mit zwei gleich grossen Stromkreisen verbunden in der Weise, dass während der Stromkreis von A durch eine Funkenstrecke unterbrochen wird, der Stromkreis von B geschlossen ist und vermittelst eines Schiebers S auf jede beliebige Grösse eingestellt werden kann, bis er dem andern genau entspricht.

Wenn nun A geladen und entladen wird, so stören die bei jeder Entladung auftretenden Oscillationen den

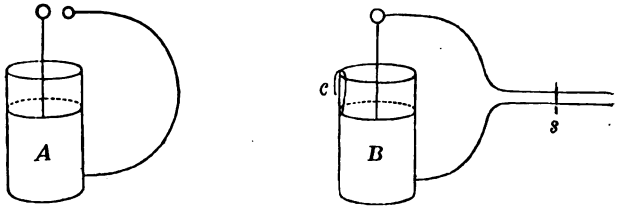


Fig. 54. — Zwei Leydener Flaschen, die so angeordnet sind, dass, wenn die eine entladen wird, die andere, kurz geschlossene auf dem sich darbietenden Staniolpfade c überläuft. (Siehe Lodge, Nature 41. Band S. 368. Siehe auch § 194.)

Stromkreis B und erregen in ihm ähnliche aber schwächere Schwingungen. Werden die beiden Flaschen und ihre Stromkreise sehr genau auf einander abgestimmt, was sich durch Hin- und Herrücken des Schiebers S leicht bewirken lässt, so können die Schwingungen in Flasche B so heftig werden, dass sie überläuft; zwar wird dies schwerlich von selbst geschehen, wenn der Rand nicht ungewöhnlich niedrig ist; klebt man aber einen schmalen Staniolstreifen, c, derart auf das Glas,

dass er sich von der inneren Belegung über den Rand hinweg bis in die Nähe der äusseren Belegung erstreckt, so entsteht dadurch ein bequemer Pfad zum Ueberlaufen, dessen sich die Störung sofort bedient. Sind nun die beiden Stromkreise so angeordnet, dass ihre Ebenen parallel liegen und ihre Entfernung von einander nicht mehr als 2 oder 3 mal soviel beträgt als ihr Durchmesser, so wird man bei jeder Entladung der Flasche A einen hellen Funken aus dem Staniolstreifen in die äussere Belegung der Flasche B überspringen sehen.

Eine leichte Verrückung des Schiebers S genügt gewöhnlich, um die Abstimmung der Flaschen zu stören und die Wirkung aufzuheben.

192. Man bezeichnet diese Erscheinung gewöhnlich als „Resonanz"; und nicht mit Unrecht; denn es kommen bei der Entladung einer solchen Flasche sehr viele Schwingungen auf einen Funken. Wenn daher die Abstimmung nicht ganz genau ist, so können Gegenstösse entstehen und die Vernichtung der ersten Wirkung herbeiführen. Aber der Ausdruck „Resonanz" erinnert doch zu sehr an irgend eine akustische Reverberationserscheinung, um ganz zutreffend zu sein. Er dient gewöhnlich dazu, um den sympathischen Widerhall in gleichgestimmten Vibratoren zu bezeichnen. Aber selbst in der Akustik erweckt er kaum diese Vorstellung, ausser durch blosse Gewohnheit. Dasjenige was hauptsächlich betont werden soll, ist die Uebereinstimmung in der Schwingungsperiode zweier Körper

und diese wird gut ausgedrückt durch das Eigenschaftswort „synton", das Herr A. T. Myers zu diesem Zweck vorgeschlagen hat. Das, was man bisher als Resonanz bezeichnet hat, möchte ich also in Zukunft „Syntonik" nennen.

193. Bei den oben geschilderten Stromkreisen wechselt der Strom mit einer nach heutigen Begriffen mässigen Geschwindigkeit — nämlich ungefähr 1 Mill. Mal in der Sekunde. Die Geschwindigkeit lässt sich unschwer

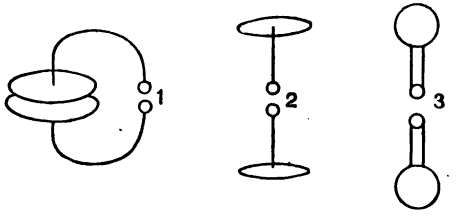


Fig. 55. — Erläutert die Verwandtschaft zwischen der Leydener Flasche und dem Hertz'schen Oscillator.

steigern oder verringern. Will man sie steigern, so kann man den aus Draht bestehenden Theil des Stromkreises verkürzen oder die Belegungen der Flasche verkleinern und weiter von einander entfernen.

Die Figuren auf dem obenstehenden Diagramm zeigen den allmählichen Uebergang einer Leydener Flasche in einen Hertz'schen Oscillator gewöhnlicher Konstruktion; je kleiner und kürzer der Apparat, um so höher wird die Frequenz der Schwingungen sein. Es lässt sich leicht ein Oscillator herstellen, dessen Wellen nur 1 m

lang sind, wobei seine Ladung mit einer Geschwindigkeit von 300 Mill. in der Sekunde oscillirt. Noch raschere Schwingungen erzielt man mit Kugeln. Eine einzelne Kugel genügt; doch bringen mehrere gleiche Kugeln zuweilen stärkere Wirkungen hervor;[1]) mit einer Kugel von 5 cm Durchmesser erhielt ich Schwingungen, die 12 bis 13 mal so schnell waren, als die oben erwähnten. Vorläufig ist es jedoch unmöglich, wahrnehmbare Schwingungen zu erzeugen, deren Geschwindigkeit eine Billion in der Sekunde beträgt; und doch müssten sie eine Geschwindigkeit von mindestens 400 Billionen in der Sekunde haben, um auf unsere Netzhaut einzuwirken.[2])

194. In Ermangelung der Netzhaut verhilft uns also das Princip der Syntonik dazu, die Wellen wahrzunehmen; als „elektrisches Auge" dient dabei irgend ein Leiter mit gleicher Schwingungsdauer. Er darf dem primären Leiter in jeder Beziehung gleich sein, gewöhnlich aber unterscheiden sich der Erreger und Empfänger. So ist z. B. auf Fig. 54 der primäre Stromkreis von einer Funkenstrecke durchbrochen, der sekundäre Stromkreis dagegen muss geschlossen sein, da sonst die ersten, schwachen

[1]) Siehe Nature 41. Band S. 462 März 1890. Siehe auch Fig. 64 unten.

[2]) Ein Sekundenpendel schwingt 1 Mill. Mal in 12 Tagen oder 1000 Mill. Mal in 30 Jahren. Eine Stimmgabel, die auf das zweigestrichene c (1000 Schwingungen in der Sek.) gestimmt ist, schwingt in 30 Jahren 1 Bill. Mal. Ehe also eine solche Stimmgabel soviel Schwingungen ausführt, wie ein dunkelrothes Licht in einer Sekunde, muss ein Zeitraum von 12000 Jahren verstreichen.

elektrischen Oscillationen, welche durch passend abgestimmte Impulse allmählich gesteigert werden sollen, nicht auftreten können. Eine Leydener Flasche wie A ist daher als Empfänger unbrauchbar. Bei der Leydener

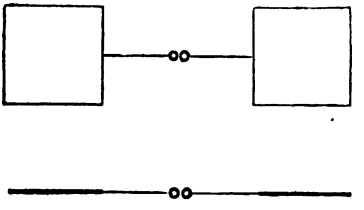


Fig. 56.

Flasche B muss der Stromkreis sorgfältig geschlossen werden. Das seitliche Ueberlaufen wird alsdann die inducirte Wirkung anzeigen.

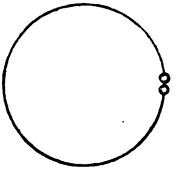


Fig. 57.

Die Figuren 56 bis 58 zeigen einige Hertz'sche Oscillationen verschiedener Konstruktion, sowie Methoden, um daraus einen parallelen Strahl zu entsenden.

Der Kreis auf Fig. 57 stellt zunächst einen magnetischen Empfänger dar; denn man hält ihn am

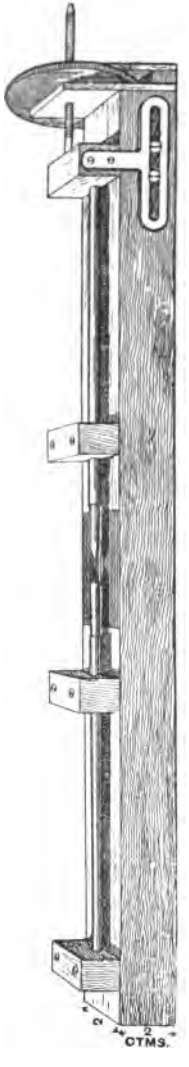


Fig. 58. — Linearer Empfänger nach Lodge. Zwei 26 cm lange Kupferdrähte sind von etwas kürzeren Glasröhren umgeben. Der eine kann vermittelst einer Schraube mit starkem Kopf bewegt werden. Das Ganze ruht auf einem Tiekbrett von 60 × 2 cm.

Besten so, dass sich die magnetische Oscillation längs seiner Axe, d. h. senkrecht zu seiner Ebene vollzieht; alsdann erscheinen Funken oder Fünkchen auf seiner mikroskopischen Funkenstrecke.

Wird der Kreis so gedacht, dass die Linie, welche seine Kugeln verbindet, parallel der elektrischen Kraft verläuft, so erzeugt auch diese Funken; denn der Kreis kann alsdann als ein verzweigter Leiter betrachtet werden, dessen einer Zweig unterbrochen und daher unwirksam ist. Aber um die elektrische Kraft nachzuweisen, ist ein linearer Empfänger einfacher und daher vorzuziehen.

Ich benutzte gewöhnlich zwei steife Drähte, die jeder eine halbe Wellenlänge lang waren und einander gegenüber auf einer langen Mahagonileiste ruhten. Ihre einander zugekehrten Enden sind zugespitzt und das eine kann vermittelst einer Schraube, die durch eine Glasröhre hindurch angreift, vorwärts und rückwärts bewegt

werden. Wenn das Holz in der Umgebung der Spitzen geschwärzt und sonst vor Licht geschützt ist, sind ausserordentlich kleine Funken wahrnehmbar. (Fig. 58.)

Umfangreicher aber anschaulicher ist ein Resonator, dessen Konstruktion der des Oscillators genau gleicht,

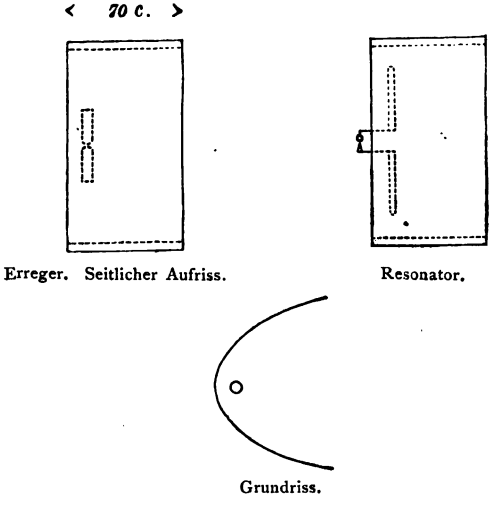


Fig. 59. — Kleiner Hertz'scher Oscillator und Resonator in der Brennlinie eines parabolischen Spiegels angeordnet, um einen parallelen Strahl auszusenden und zu empfangen.

wie auf Fig. 56, bei dem jedoch der Verbindungsdraht zwischen den beiden Platten kontinuirlich ist, statt durch eine Funkenstrecke unterbrochen zu sein. In diesem Draht beginnen und steigern sich die Oscillationen unter der Einwirkung der Syntonik oder Resonanz. Die dadurch entstehenden Funken kann man nach-

weisen, indem man ein Federmesser oder eine andere Spitze einer der beiden Platten nähert.

Fig. 60. — Elektrische Retina nach Lodge. Eine Reihe kupferner Cylinder von 40 cm Länge und je 14, 13, 12, 11, 10, 9 cm Durchmesser sind, wie die Stäbchen und Zapfen im Auge, einer Strahlungsquelle gegenüber aufgestellt und reagiren durch elektrische Schwingungen in ihrem Durchmesser auf eine bestimmte Frequenz. Nature Band 41 S. 462. Siehe auch S. 330 oben.

Ein Resonator, der ganz wie ein Oscillator gebaut ist und dessen Funkenstrecke dieselbe Lage hat, thut auch gute Dienste; doch muss er einer untergeordneten Oscillation, am Besten einer solchen in jeder Hälfte des

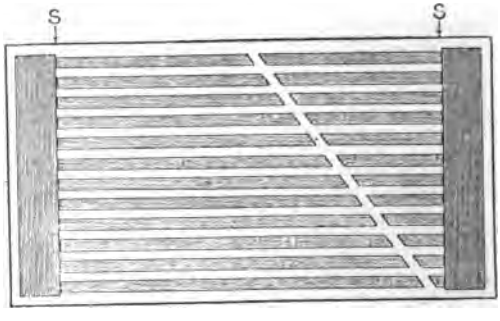


Fig. 61. — Robinson's elektrische Harfe reagirt auf Schwingungen innerhalb eines ziemlich bedeutenden Umfanges von Wellenlängen. Die Staniolstreifen sind nur zum Theil dargestellt. In Wirklichkeit sind es 51 dicht zusammengepackte Streifen. Ihre Länge beträgt 30 cm bis 1 cm. Die Funken erscheinen bei den mit S bezeichneten feinen Messerschnitten. Die schräge Lückenreihe dient einfach dazu, um die Streifen in abgestufter Reihenfolge abzugrenzen.

Erregers, entsprechen; sonst ist er nicht wirklich synton. Bei Oscillatoren mit kurzen Wellen braucht die Stimmung keine sehr genaue zu sein, da die Dämpfung ungeheuer gross ist. Bei grösseren Kapa-

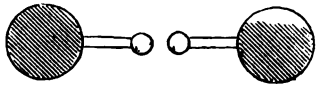


Fig. 62. — Kleiner Oscillator, $^1/_8$ natürl. Grösse, für Versuche mit der Pechlinse bestimmt. (Lodge und Howard, Phil. Mag., Juli 1889.) Schwingungsdauer 300 Mill. in der Sekunde.

citäten wie bei den Leydener Flaschen auf S. 377 ist die Harmonie wesentlich.

195. Zuweilen benutzte ich auch als Oscillator eine einfache Kugel, der zwei mit einer Induktionsspule verbundene Knöpfe von beiden Seiten Funken zuführten;

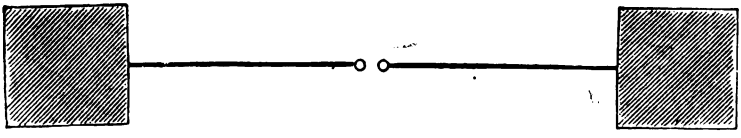


Fig. 63. — Ungeheurer Oscillator, $^1/_{80}$ natürl. Grösse, für starke Fernwirkungen bestimmt. Wird er durch eine sehr grosse Spule erregt, so geben die meisten Gas- und Wasserröhren im Gebäude, sowie ein eisernes Gitter einander oder einem in ihre Nähe gebrachten Leiter Funken ab. (Lodge, „Blitzableiter".) Schwingungsdauer 10 Mill. in der Sekunde. Durchschnittliche Strahlungsenergie, solange sie anhält, 64 Pferdekräfte.

als Empfänger diente eine zweite genau gleiche Kugel, die ich am Ende des passenden Durchmessers mit einem Federmesser berührte oder leicht streifte. Dieser Apparat erwies sich als unerwartet empfindlich und erzeugt sehr kurze Wellen. (Fig. 64).

Auf grössere Entfernungen wirkt am kräftigsten die Strahlung eines grossen Oscillators, d. h. eines solchen mit ausgedehntem Felde; theils weil die vor der Entladung elektrostatisch aufgezeichnete Anfangsenergie

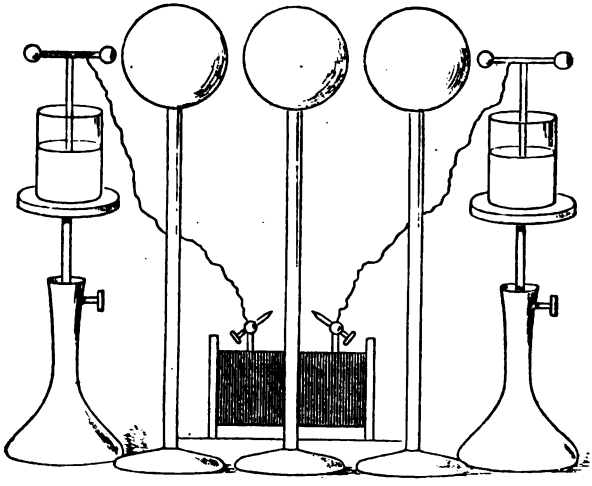


Fig. 64. — Apparat mit dreifacher Strahlungsquelle, (Kugeln von 15 cm Durchmesser), geeignet zur Erregung der elektrischen Retina Fig. 60. (Nature 41. Band S. 462.)

grösser ist, theils wegen seiner resonanzbodenähnlichen Beschaffenheit.

Eine längere Funkenstrecke bietet dagegen keine Vortheile, denn ihr Widerstand vergeudet Energie. Am zweckmässigsten ist gewöhnlich eine Länge von ungefähr $1\,^1/_2$ cm oder weniger.

Je kleiner der Oscillator, um so besser muss die Kugel polirt sein, da die Störung sonst nicht plötzlich genug auftritt. Es bedarf ausserordentlich plötzlicher Störungen, um in solchen rasch oscillirenden Körpern Wellen zu erregen. Das Potential hat sonst Zeit ins Gleichgewicht zu kommen, ungefähr wie wenn ein Bierfass vorsichtig umgestülpt wird, und es entstehen keine Wellen.

Man lasse kein ultraviolettes Licht auf die Kugeln fallen, namentlich nicht auf die Kathode, da sich die Funken unter seiner Einwirkung zu leicht und anscheinend weniger plötzlich bilden. Besonders störend wirken alle Arten von Glimmentladungen; es ist dies wahrscheinlich ein Grund, weshalb eine Voss'sche oder Wimshorst'sche Elektrisirmaschine gewöhnlich weniger wirksam ist, als eine Spule, selbst wenn sie die gleiche Anzahl von Funken in der Sekunde erzeugt. Die Beschaffenheit des Funkens ist von grosser Wichtigkeit, ist aber leider Zufälligkeiten unterworfen. An manchen Tagen sendet er fast garkeine Strahlung aus, an andern reagirt der Resonator auf überraschende Entfernungen. Uebung verringert indessen diese Störungen und ein mittelgrosser Oscillator, dessen Untersätze einen Meter von einander entfernt sind, wird selten irgend welche Schwierigkeiten bereiten.

Der Vorgang der Strahlung

196. Man betrachte nun genauer, was vorgeht. In dem Stromkreis der Flasche A (Fig. 54) wechselt ein elektrischer Strom hin und her und ladet die Belegungen mit abwechselnd positiven und negativen Ladungen. Hierdurch entsteht längs der Achse des Stromkreises und senkrecht zur Ebene der Zeichnung eine magnetische Oscillation. Diese ist es, von der man annehmen darf, dass sie den Aether in der Ferne in Schwingungen versetzt. Der Apparat ist in der That zunächst ein magnetischer Oscillator und erregt auf die gewöhnliche Art indirekte Ströme. Aber er thut mehr als das; er erzeugt wirkliche Wellen, die nicht zu ihm zurückkehren, sondern seine Energie in den Raum hinaustragen.

Ein linearer Vibrator, wie Nr. 3 auf Fig. 55 darf in erster Linie als ein elektrischer Oscillator bezeichnet werden; denn das Hin- und Herwallen der Elektricität von einem Ende zum andern ist seine Haupteigenschaft. Seine Pole sind am Schluss jeder halben Schwingung abwechselnd positiv und negativ; daher entsteht die elektrische Spannung, die der umgebende Aether erleidet. Während der mittleren Schwingungsphase ist keine elektrostatische Spannung vorhanden, aber es besteht dann ein linearer Strom, der rings um sich herum eine

magnetische Wirkung ausübt, wodurch kreisförmige magnetische Kraftlinien um den Leiter entstehen.

Ringförmige Vibratoren, wie Nr. 1 auf Fig. 55 oder Fig. 57 verursachen eine elektrische Störung nur als Sekundärwirkung der längs ihrer Axe auftretenden magnetischen Oscillation, welche ihre Primärwirkung ist. Lineare Oscillationen erregen primär eine elektrische Oscillation. Aber bei keinem von beiden treten die magnetischen und elektrischen Oscillationen gleichzeitig auf; die eine bleibt zeitlich eine Viertelperiode hinter der andern zurück, genau wie die Maximalgeschwindigkeit und der Maximalausschlag eines einfachen Pendels sich um eine Viertelperiode unterscheiden.

Diese Verzögerung gleicht sich übrigens eigenthümlicher Weise sehr bald wieder aus, weil die eine Bewegung einen räumlichen Vorsprung vor der andern hat. Nimmt man an, dass die magnetische Störung am Oscillator entsteht, so ist der Ursprung der elektrischen eine Viertelwellenlänge davon entfernt; obgleich sie daher eine Viertelperiode später auftritt, so wandern doch beide zusammen, ausser während der ersten Viertelwellenlänge. Sie decken sich zwar nicht, weil ihre Ebenen senkrecht zu einander sind, aber die Lage ihrer Maximalpunkte und Nullpunkte ist dieselbe. Ist die eine einer Serie von Wellenbergen und -Thälern vergleichbar, so entspricht die andere einer ebensolchen Reihe, die um einen rechten Winkel gedreht ist.

Aber innerhalb der ersten Viertelwellenlänge verhält

sich alles anders. Hier haben die elektrischen und magnetischen Kräfte bald gleiche, bald verschiedene Phasen und zuweilen sogar entgegengesetzte Vorzeichen.

Die Folgen dieses Umstandes sind wichtig, wenn auch nicht in die Augen springend. In einem veränderlichen elektromagnetischen Felde hängt die Richtung, in der sich die Energie bewegt, von der Richtung der elektrischen und magnetischen Kräfte ab, die Strömung findet im rechten Winkel zu beiden statt und kehrt ihren Sinn um, wenn eine von beiden ihr Vorzeichen wechselt. Innerhalb der ersten Viertelwellenlänge vom Oscillator haben nun die elektrischen und magnetischen Kräfte manchmal gleiche und manchmal entgegengesetzte Vorzeichen; in Folge dessen oscillirt die Energie an dieser Stelle hin und her; der grössere Theil wandert zwar in den Raum hinaus, aber eine gewisse Menge kehrt zurück und trägt dazu bei, die nächste Schwingung aufrecht zu erhalten.

Ueber die erste Viertelwellenlänge hinaus nehmen hingegen die magnetischen und elektrischen Kräfte gleichzeitig zu und ab; die eine kehrt sich nicht mehr um ohne die andere und die gesammte Energie wandert daher ununterbrochen als Strahlung in den Raum hinaus.

Ob viel oder wenig hinauswandert, hängt von der Wellenlänge ab. Bei langen Wellen befindet sich der Ausgangspunkt oder Entstehungsort der Strahlung sehr

weit vom Oscillator; daher ist die Störung dort gering. In diesem Fall kehrt der grösste Theil der Energie

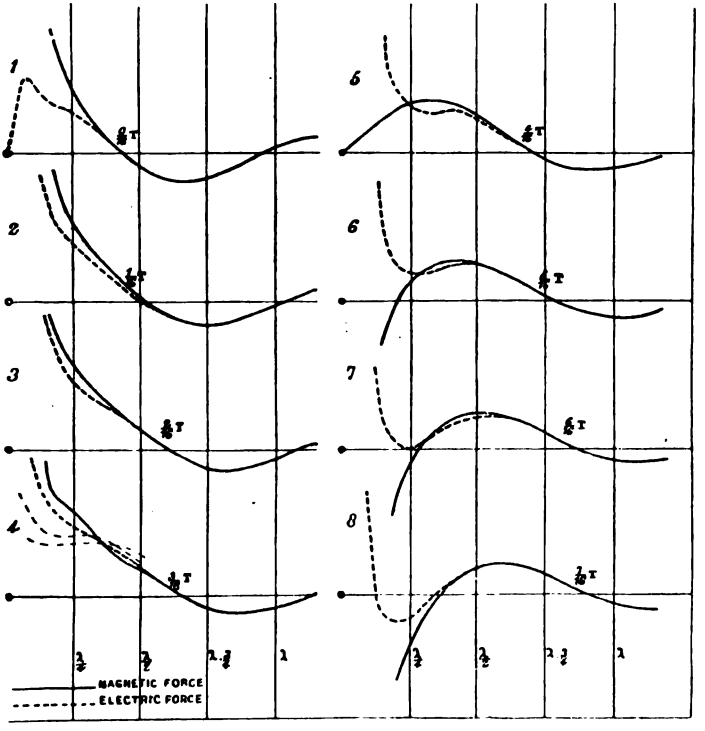


Fig. 65. — Diagramm der bei der Strahlung betheiligten elektrischen und magnetischen Kräfte. (Gezeichnet von Herrn Trouton, siehe Nature Band 42 S. 172.)

nach dem Oscillator zurück, der Grad der Dämpfung wird nur durch den Widerstand und die Erzeugung

lokaler Wärme bestimmt werden. So sendet z. B. eine gewöhnliche Wechselstrommaschine mit einer Frequenz von 100 in der Sekunde Wellen von 3000 Kilom. aus. In Folge dessen ist der Radius, an dem ihre Energie anfängt auszustrahlen, ungefähr ebenso weit entfernt, wie die Shetland-Inseln von London, es findet also kein messbarer Verlust an Energie durch unkompensirte Ausstrahlung von Wellen statt. Ein kleiner Hertz'scher Oscillator dagegen, dessen Wellenlänge nur 1 m beträgt, strahlt, solange seine Wirksamkeit anhält, ausserordentlich stark, noch stärker als Sonnenlicht; und das rasche Erlöschen seiner Schwingungen ist fast ausschliesslich diesem Grunde zuzuschreiben.

Man beachte, dass sich die wirksame Quelle der ausgesandten Strahlung, auch die des Lichtes, nicht am Oscillator selbst, sondern eine Viertelwellenlänge davon entfernt befindet. Wenn man annähme, dass die Strahlung am Oscillator entsteht, so würde man eine zu grosse Fortpflanzungsgeschwindigkeit erhalten, wie Hertz nachgewiesen hat. Sie wandert vielmehr mit einem Vorsprung von einer Viertelwellenlänge und ihre Phase ist demnach auf jede Entfernung um eine Viertelperiode weiter als man vermuthen sollte.

Diese Beschleunigung der Phase des gewöhnlichen Lichts um eine Viertelwelle, wurde von Sir George Stokes [1]) mathematisch entdeckt und war bereits eine

[1]) Dynamical Theory of Diffraction 1849; Stoke's Papers, vol II pp. 280, 321.

in der Optik anerkannte Thatsache; ihre Ursache ergiebt sich nunmehr aus der Maxwell'schen Theorie der Elektricität.

Die Richtung der Oscillation

197. Die elektrische Strömung, die ein linearer Oscillator, wie der auf Fig. 62 abgebildete, aussendet, findet parallel zur Achse statt; die magnetische Kraft senkrecht zu ihr und der Energiestrom oder Strahl bewegt sich vom Oscillator aus senkrecht zur elektrischen und magnetischen Störung. Da die Richtung der Schwingungen auf diese Weise präcisirt ist, so ist der Strahl, wie man in der Optik sagt, „polarisirt"; wenn es auch noch zweifelhaft ist, ob die Schwingung auf grosse Entfernungen ihre Richtung unverändert beibehält.

Ein wichtiger Versuch über die so erzeugte Strahlung wurde von Herrn Trouton in dem Laboratorium von Herrn Fitzgerald in Dublin [1]) vorgenommen, um festzustellen, welche Lage die Polarisationsebene habe, wenn ein nichtleitender, d. h. ein durchlässiger Körper unter einem passenden Winkel, arc tg μ, in den Strahl eingeführt werde. Es stellt sich heraus, dass wenn unter diesen Bedingungen die Einfallsebene mit der

[1]) Siehe den Bericht eines von Herrn Fitzgerald am 21. März 1890 in der Royal Institution gehaltenen Vortrags, Nature, Band 42, S. 172. Siehe auch Trouton: Nature, Band 39, S. 391.

Richtung der elektrischen Störung übereinstimmend angeordnet ist, keine Strahlung reflektirt wird; befindet sich hingegen die magnetische Störung in der Einfallsebene, so wird ein Theil der Strahlung reflektirt. Fresnel, der natürlich nicht wusste, dass man es mit zwei verschiedenen Schwingungsarten zu thun habe, und der das Licht noch als eine mechanische Störung in einem elastischen festen Körper ansah, vermuthete nun, dass die Richtung der von einer durchsichtigen Substanz im Polarisationswinkel reflektirten Lichtschwingungen senkrecht zu der Einfallsebene sei, in der sie reflektirt wurden. Es zeigt sich also, dass die Störung, welche Fresnel sich dachte, der elektrischen Störung entspricht; während die Schwingung, welche die Gegentheorie von Mc Cullagh voraussetzte, mit der magnetischen Störung übereinstimmt.

So bestätigt sich also Maxwell's Theorie, dass sich die magnetische Kraft in der Polarisationsebene befindet.

In einigen Fällen, wie z. B. bei der Einwirkung des Lichtes auf chemische Substanzen, bei der Zerstreuung durch kleine Theilchen u. s. w. ist die elektrische Oscillation die wirksamere von beiden; sie war es denn auch, die Stokes und andere, vom Standpunkt der elastischen Theorie des Lichtes ausgehend, als ausschliessliche Schwingungsrichtung ganz richtig behandelt haben.

Bei dem Versuch über die Reflexion im Polarisationswinkel stellte sich heraus, dass dünne Platten, wie

Glasscheiben, keine Reflexion zeigen. Es geschieht dies, weil bei der grossen Nähe der beiden Oberflächen die Reflexion der einen durch Interferenz die Reflexion der andern aufhebt; genau wie bei dem schwarzen Fleck der Newton'schen Farbenringe. Indem man jedoch eine meterdicke Wand als Reflektor benutzte, entfernte man die Oberflächen von einander; und da die Durchlässigkeit keine vollkommene war, gelang es, die Reflexion der hinteren Oberfläche so abzuschwächen, dass man die ununterbrochene Reflexion der vorderen Oberfläche erhielt. Diese veränderte sich alsdann mit dem Einfallswinkel und dem Verhältniss der Schwingungsrichtung zur Einfallsebene.

Herr Trouton hat noch eine Reihe anderer Interferenzversuche [1]) gemacht, um die Newton'schen Farbenringe und ähnliche Erscheinungen nachzuahmen, und hat einige Diffraktionserscheinungen beobachtet, wenn der Reflektor kleiner war als eine Wellenlänge; Resultate, die in Bezug auf die Richtung der Schwingung dem „experimentum crucis" von Stokes analog sind.

Am leichtesten erzielte ich Interferenzerscheinungen mit einem kugelförmigen Oscillator, einer Metallkugel von 15 cm Durchmesser, die auf einem 60 cm langen Glasstab mit hölzernem Untersatz ruhte. (Eine der auf Fig. 64 abgebildeten Kugeln.) Als Empfänger diente eine genau gleiche Kugel. Es zeigte sich, dass wenn man diesen Empfänger auf dem Tisch entlangrückte,

[1]) Siehe Nature Band 40 S. 398; auch Phil. Mag. Juli 1891.

er auf gewisse Entfernungen reagirte, auf andere nicht; näherte man ihn langsam und stetig dem Oscillator aus einer Entfernung von 3 Metern, so ergab sich eine Serie von Punkten, wo die Reaktion ausblieb, oder wenigstens ein Minimum erreichte. Als ich die Lage dieser Punkte ausmaass, entsprachen sie ziemlich genau einem Gangunterschied von 1, 3 und 5 halben Wellenlängen zwischen der Quelle und ihrem Ebenbild auf dem Tisch.

Von Kugeln erhält man meiner Ansicht nach eine reinere, mehr monochromatische Strahlung als von einem hantelförmigen Oscillator, bei dem die Funkenstärke in der Mitte liegt. Ich ziehe es in der Regel vor, die Funkenstrecke nicht in die Mitte sondern über den Oscillator hinaus zu verlegen und von Schwingungen abhängig zu sein, die in einem regelmässig geformten leitenden Körper durch die plötzliche Ertheilung einer elektrischen Ladung erregt werden.

Andere Empfänger oder Apparate zum Nachweis der elektrischen Strahlung

Seit Hertz entdeckt hat, dass in einem Leiter, den man der elektrischen Strahlung aussetzt, kleine Funken erregt werden können, sind zahlreiche andere Methoden ersonnen worden, um diese Strahlung nachzuweisen. Herr Dragoumis zeigte in meinem Laboratorium, dass

Geisler-Röhren, die dem oscillirenden Felde in der Nähe eines elektrischen Oscillators ausgesetzt werden, leuchten, ohne mit Drähten oder irgend einer Form von Leitern verbunden zu sein[1]; auch dass sie ein bequemes Mittel sind, um den Hertz'schen Versuch einem kleineren Zuschauerkreis vorzuführen, wenn man sie mit einem gewöhnlichen, abgestimmten Resonator verbindet. Sie leuchten nicht stark genug, um von Weitem oder in nicht verdunkeltem Raume sichtbar zu sein; aber wenn sie Crookes'sche phosphorescirende Pulver enthalten, sind sie ziemlich hell. Die hellste, die ich besitze, wurde mir im Jahre 1889 von Herrn Lenard in Heidelberg zugesandt und enthält Strontiumsulfid, verunreinigt mit Fluorkalcium und einer Spur von Kupfer, die zur Erzeugung eines hellen Glanzes nothwendig zu sein scheint.[2] Ich schätze die Lichtstärke dieser Röhre, wenn ihre Enden mit den Polen einer kleiner Spule verbunden sind, auf ungefähr eine halbe Kerze und pflege sie meinen Schülern vorzuführen als möglichen Embryo des Lichts der Zukunft.

In diesem Sinne beschäftigt sich Herr Crookes schon lange mit der Phosphorescenz. Vor Kurzem aber erregte Herr Nicola Tesla allgemeines Entzücken durch seine Konstruktion einer Wechselstrommaschine von ausserordentlicher Frequenz, die als Mittel zur Aufrechterhaltung elektrischer Schwingungen gelten kann und

[1]) Nature Band 39 S. 548.
[2]) Wiedem. Ann. 38 S. 90.

Geisler-Röhren sowie andere Körper zu beträchtlich stärkerem Leuchten bringt. Es bleibt sich gleich, ob sie dabei mit der Quelle verbunden sind oder nicht, stets unterliegen sie raschen elektrischen Oscillationen.

Die Schwingungen, welche Tesla's Dynamomaschine aufrecht erhält, sind augenblicklich noch „langsam", d. h. ihre Frequenz beträgt, soviel ich weiss, noch nicht 100,000 in der Sekunde. Aber sie sind wesentlich rascher als irgend welche Schwingungen, die bis jetzt *dauernd* aufrecht erhalten worden sind. Die Schwingungen der Leydener Flasche und des Hertz'schen Oscillators, deren Frequenz Millionen oder Tausende von Millionen in der Sekunde beträgt, dauern keine messbare Zeit. Mit 3, 4 oder höchstens 12 Schwingungen erlöschen sie. Die Pausen stehen in einem beängstigenden Verhältniss zu den Augenblicken der Wirksamkeit, selbst wenn Hunderte von Funken in der Sekunde erregt werden; aus diesem Grunde sind alle Licht- oder andere Wirkungen, die sie erzeugen können, äusserst schwach. Um sie bei höchster Intensität zu erhalten, würde es freilich einer beträchtlichen Anzahl von Pferdekräften bedürfen; alsdann aber würde man erstaunliche Wirkungen erzielen.[1])

Ein anderes Verfahren, um die elektrische Strahlung

[1]) Die Kraft des tropischen Sonnenlichtes (d. h. des Lichtes in der Entfernung von der Sonne zu der Erde, aber frei von klimatischen, natürlichen oder künstlichen Einflüssen) beträgt ungefähr 2 Pferdekräfte per Quadratmeter.

nachzuweisen, gründet sich auf ihre erwärmenden Wirkungen. Der kürzlich verstorbene Herr Gregory konstruirte zu diesem Zweck einen sehr empfindlichen Apparat, der aus einem feinen Draht in Verbindung mit einer Spiralfeder nebst Spiegel bestand und äusserst geringe Längeveränderungen in wahrnehmbare Rotationen umsetzte. Wurde dieser Empfänger in einem oscillirenden Felde so angebracht, dass seine Länge zu der Richtung der elektrischen Störung parallel war, so erwärmte er sich durch die in ihm inducirten elektrischen Ströme und verursachte eine messbare Ablenkung eines Lichtstrahls. Herr Gregory hoffte mittelst dieses Instrumentes eine Reihe von metrischen Bestimmungen in der Nähe eines Hertz'schen Oscillators vornehmen zu können; allein die Schwierigkeit, zuverlässige Resultate zu erzielen, beruht vorläufig weniger auf der Beschaffenheit des Empfängers, der zweckmässig zu sein scheint, als auf dem unberechenbaren Verhalten der Funken am Oscillator. Könnte man sich darauf verlassen, dass ein Funken wäre wie der andere, so würden viele Unzuträglichkeiten wegfallen, die gegenwärtig von der Untersuchung der elektrischen Strahlung unzertrennlich sind.

Eine andere thermische Methode ist kürzlich von verschiedenen Experimentatoren versucht worden, nämlich die Einführung eines empfindlichen Thermoelementes in den aus dünnem Draht bestehenden Resonator. Dieses wird durch die inducirten Ströme erwärmt und kann mit einem Galvanometer verbunden werden.

Um die Erscheinungen lediglich auf grössere Entfernungen sichtbar zu machen, ist vielleicht die von Herrn Fitzgerald entdeckte Methode die geeignetste. Er fand, dass, wenn die beiden Hälften eines gewöhnlichen Hertz'schen Resonators mit einem empfindlichen Galvanometer aus dünnem Draht verbunden werden, die Nadel ausschlägt, sobald die Fünkchen auftreten.

In ähnlicher Weise bediente sich Herr Blyth aus Glasgow eines Quadrant-Elektrometers, während nach der Methode des Herrn Boltzmann das Fünkchen selbst einen vorübergehenden Kontakt zwischen einer geladenen Leydener Flasche und einem Elektroskop herstellt und sich auf diese Weise kundgiebt.

Die Wirkung, die Herr Fitzgerald beobachtete, beruht darauf, dass auf den Platten, die durch den Draht des Galvanometers verbunden sind, elektrostatische Ladungen inducirt werden. Tritt kein Funken auf, so gehen ihre Ladungs- und Entladungsmengen beide durch das Galvanometer hindurch, ohne eine Wirkung hervorzubringen; wenn jedoch ein Funken überspringt, so geht die Ladung allein hindurch und verursacht eine minimale Wirkung.

Etwas Aehnliches bemerkte ich beim Experimentiren mit einer Blitzschutzvorrichtung. Wenn die Knöpfe der Vorrichtung sehr nahe beisammen waren und zum Schutz eines Galvanometers dienten, erlitt das Galvanometer unberechenbare Störungen, sobald auf der mikroskopischen Funkenstrecke ein Funken übersprang. War

die Funkenstrecke sehr gross, so geschah nichts; war sie sehr klein, d. h. gleich Null, so geschah auch nichts; aber kurz von Null war die Wirkung eine sehr ausgeprägte, und es fand sich zuweilen, dass die beiden Pole der Funkenstrecke nachher an einem einzelnen Punkt schwach zusammenhingen.

Dies liess auf eine Art von thermo-elektrischem Kontakt schliessen; auch Herr Hughes hat, wie er mir mittheilt, einmal dieselbe Beobachtung gemacht und ist zu diesem Schluss gelangt. Jetzt möchte ich jedoch bezweifeln, dass die Wirkung eine thermische ist; vielmehr neige ich dazu, sie für eine chemische zu halten, die vielleicht auf der von Schuster entdeckten vorübergehenden Dissociation der Luftmolekeln im Funken oder auf der ungleichen Oxydation der beiden Pole beruht.

Die Thatsache, dass das Licht der Phosphorescenz, z. B. das Licht von Leuchtkäfern, weit sparsamer ist als irgend eine andere bekannte Lichtart (d. h. dass es fast ausschliesslich aus solchem Licht besteht, welches geeignet ist auf die Netzhaut einzuwirken, siehe § 151) ist nunmehr von Herrn Langley am Smithson Institute in Washington sicher festgestellt worden.[1])

Er untersuchte mit dem Bolometer das Spektrum eines Leuchtkäfers und fand, dass die ganze Intensität

[1]) Langley und Very: „On the Cheapest Form of Light, from Studies ad the Allegheny Observatory." Phil. Mag. September 1890 S. 27

der Strahlung sich auf den sichtbaren Theil des Spektrums koncentrirt, während von ultrarothen und ultravioletten Strahlen fast keine Spur vorhanden ist. Es ist immerhin seltsam, dass die Augen der Leuchtkäfer, für welche dieses Licht natürlich bestimmt ist, auf genau dieselben Wellenlängen reagiren wie unsere Augen. Ohne diese Thatsache würde es nicht unberechtigt sein, anzunehmen, dass vielleicht andere Thiere häufig Strahlung aussenden, für welche unser Auge unempfindlich ist, die sie untereinander aber sehen. Die Beobachtung von Herrn Langley schliesst allerdings diese Möglichkeit nicht aus, macht sie aber unwahrscheinlich und lässt vielmehr vermuthen, dass diejenige molekulare Zusammensetzung des thierischen Gewebes, welche zur Wahrnehmung des Lichts geeignet ist, eine bestimmte Form hat und keine Veränderung erleidet.

Die lichtempfindlichen Organe der Pflanzenwelt reagiren auf ungefähr denselben Schwingungsumfang; denn ultraviolettes Licht von zu hoher Schwingungszahl, wie das von elektrischem Bogenlicht ausgesandte, ist den Pflanzen schädlich und Chlorophyll soll von infrarothen Strahlen nicht afficirt werden. Der Gesichtsumfang von Algen und andern unter dem Wasser lebenden Pflanzen ist, soviel ich weiss, noch nicht festgestellt worden.

Undurchlässigkeit

Die Möglichkeit, Versuche mit Strahlungen von verschiedenster Wellenlänge anzustellen, lässt die Frage nach der Undurchlässigkeit in einem neuen Licht erscheinen. Bekanntlich sind alle Körper in dünnen Schichten durchlässig, selbst Gold, wenn es dünn genug ist; dagegen werden die meisten Gegenstände undurchlässig, wenn sie in hinreichend dicken Schichten auftreten.

Die Undurchlässigkeit soll aber nach Maxwell's Theorie nicht blos von der Beschaffenheit des Mittels abhängen, sondern auch von der Schwingungsdauer des Lichtes, das hindurchzudringen versucht. Denn dieses wird nicht sofort, sondern erst nach einer gewissen Zahl von Schwingungen ausgelöscht. Wenn man sich einen Stoff denkt, der so beschaffen ist, dass er den grössten Theil eines einfallenden Strahles im Laufe von drei Schwingungen vernichtet oder reflektirt, so wird es ausschliesslich von der Wellenlänge dieser Schwingungen abhängen, wie dick die Schicht sein muss, um undurchlässig zu wirken. Sind die Wellen $\frac{1}{2000}$ mm lang, wie gewöhnliches Licht, so wird ein blosses Häutchen genügen. Sind sie 30 cm lang, so ist eine meterdicke Wand erforderlich. Und wenn

die Wellenlänge nach Kilometern zählt, so wird kein praktisch herstellbares Hinderniss sie aufhalten.

Der Versuch bestätigt dies.

Hertz'sche Wellen dringen durch hölzerne Thüren und steinerne Mauern — natürlich nicht ohne einigen Verlust; aber sie werden vollständig aufgehalten durch Kupferblech, sogar durch Staniol. Es ist mir nicht möglich gewesen, sie jenseits eines mit Britanniametall überzogenen Papiers nachzuweisen. Aber ein Ueberzug von Graphit lässt sie zum Theil hindurch. Sehr lange Wellen, wie sie von einem Elektromagneten ausgehen, der von einem gewöhnlichen Wechselstrom gespeist wird, dringen nicht nur durch Mauern und Gebäude, sondern sogar durch Kupferblech; allerdings auch nicht ohne einen gewissen Verlust. Ist das Kupfer hinreichend dick, so wird nicht viel hindurchdringen. Ein *vollkommener* Leiter, wenn es einen solchen gäbe, würde alles reflektiren, wenn er noch so dünn wäre. Noch längere Wellen, wie sie entstehen, wenn man einen Magneten langsam hin- und herbewegt, dringen durch jede nicht allzustarke Kupferplatte und lenken Magnetnadeln auf der andern Seite ab. Aber je schneller man den Magneten bewegt, um so stärker werden die Wellen reflektirt; am Besten demonstrirt man den Versuch, indem man nicht den Magneten, sondern das Kupfer bewegt. Sir W. Thomson befestigte einen Magneten in einem dicken, kupfernen Gehäuse und zeigte, dass wenn das Gehäuse rasch

rotirte, eine ausserhalb desselben befindliche Magnetnadel viel weniger abgelenkt wurde, als wenn es stillstand.[1])

Herr Pictet in Berlin hat kürzlich festgestellt, dass alle solche Schirme merkwürdig durchlässig sind gegen „Wärmestrahlen" von Körpern, deren Temperatur etwa 200 Centigrade unter Null beträgt.

Es giebt also alle möglichen Grade von Durchlässigkeit, je nach der Frequenz der einfallenden Schwingung. Für sehr lange Wellen sind fast alle Körper durchlässig, für sehr kurze Wellen sind fast alle Körper undurchlässig.

Der Druck des Lichts

Maxwell war bereits davon überzeugt, dass Licht, welches auf eine reflektirende, metallische Oberfläche fällt, einen winzigen, aber berechenbaren Druck oder Stoss ausüben müsse. So muss tropisches Sonnenlicht, das senkrecht auf einen Quadratcentimeter Silber fällt, einen Druck von etwa $\frac{1}{10\,000}$ Dyne ausüben; denn ungefähr diese Kraft ist erforderlich, um den Strom der Energie umzukehren. Der Druck des Sonnenlichts auf die gesammte Erdoberfläche beträgt ungefähr 100 Mill. Kilo. Auf einem hinreichend kleinen Stäub-

[1]) Proc. Roy. Soc. Band 49 S. 422.

chen eines Kometenschweifs könnte die Sonnenstrahlung die Anziehungskraft der Sonne überwiegen.[1])

Diese Wirkung ist, obgleich sie von Herrn Crookes gesucht wurde, bei gewöhnlichem Licht noch nicht nachgewiesen worden. Sie wird nämlich vollständig überdeckt durch die erheblich stärkere Wirkung der Luftmolekeln, von der man sich selbst in einem auf das Sorgfältigste ausgepumpten, sogenannten luftleeren Raum nicht befreien kann. Herr Crookes hatte jedoch das Glück, wenigstens diese molekulare Wirkung zu entdecken und das Radiometer zu erfinden. Sollte die direkte Wirkung überhaupt noch beobachtet werden, so müsste dies auf einer sehr hellen Fläche geschehen. Schwarze Flächen erwärmen sich und werden dann durch die abprallenden Molekeln zurückgestossen.

Indessen ist es kaum mehr nöthig, sich darum zu bemühen, da die direkte Wirkung vollständig deutlich wird, sobald man sich längerer Wellen bedient.

Es handelt sich in der That um nichts anderes als um die von Faraday entdeckte Erscheinung: das eigenthümliche Verhalten metallischer Massen in der Nähe eines Magnetpols, wie es in § 80 Fig. 28 geschildert wurde.

Nähert man eine Kupferscheibe einem Magneten, der von einem Wechselstrom gespeist wird, so wird sie

[1]) Siehe einen kurzen Bericht vom Verfasser in der Nature Band 44 S. 454. Derselbe Gegenstand war bereits von Herrn Fitzgerald behandelt worden (Proc. Roy. Dub. Soc. Mai 1882).

abgestossen durch die in ihr inducirten Ströme und deren Rückwirkung auf das Feld. Aus genau demselben Grunde übt Licht einen Druck auf leitende Flächen aus. Es inducirt in ihnen Ströme und stöfst diese dann ab, weil es nicht mit ihrer Phase übereinstimmt. Allerdings ist die Abstossung einer Scheibe in der Nähe eines wechselnden Magneten keine stetige oder in derselben Richtung stattfindende Erscheinung; es können auch Augenblicke der Anziehung eintreten; im Ganzen aber überwiegt die Abstossung; sie findet ausschliesslich statt, wenn die Wechsel sich rasch und mit wellenförmiger Gleichmässigkeit vollziehen.

Herr Elihu Thomson hat die grosse Kraft der uns jetzt zu Gebote stehenden Wechselströme benutzt, um diese Form der Abstossung auf verschiedene Art schlagend zu veranschaulichen. Er lässt sie Ringe tragen, Kugeln rotiren und Kräfte ausüben, die in Kilogrammen ausdrückbar sind.

Zukünftige Versuche

Versuche über optische „Dispersion", die den Zweck hätten, die Mechanik des Vorganges zu erklären und Aufschluss über die Wechselwirkung zwischen den materiellen Atomen und dem Aether, in den sie eingebettet sind, zu gewähren, sind meines Wissens bis jetzt noch nicht gemacht worden. Aber die Herren

Fitzgerald und Trouton haben vorgeschlagen, Pech oder Paraffin mit Kugeln oder dergleichen zu durchsetzen und zu beobachten, wie sich ein Prisma aus dieser Substanz gegen Hertz'sche Wellen verhält, deren verschiedene Längen nicht bedeutend grösser sind als die in der durchlässigen Substanz eingebetteten Kugeln.

Lehrreich sind ferner ihre Gedanken über die Art, wie elektrische Schwingungen von hoher Frequenz aufrecht zu erhalten wären [1]), ohne dass, wie bisher, zwischen je zwei Funken jene leidigen Pausen der Dunkelheit oder Unthätigkeit eintreten, die sich zu der Dauer einer Schwingung verhalten wie ein Jahr zu einer Minute. Ein Vorgang, der blos fünf Minuten dauert und nur einmal im Jahre wiederkehrt, ist, so glänzend er sein mag, kaum geeignet, einen grossen Eindruck auf die Mitwelt hervorzubringen.

Der Fortschritt auf dem Gebiet der künstlichen Lichterzeugung, wie sie §§ 149—151 besprochen wurde, scheint sich also nach zwei verschiedenen Richtungen zu entwickeln. Auf der einen Seite sucht man Apparate zu konstruiren oder Gesetze zu finden, durch welche elektrische Schwingungen von der gewünschten Frequenz dauernd erzeugt und erhalten werden können; auf der anderen Seite vertraut man auf die Eigenschaften gewisser Molekeln, die durch verhältnissmässig langsame elektrische Oscillationen in Schwingungen versetzt und

[1]) Auszug in Nature 45 S. 358.

auf diese Weise zum Phosphoresciren gebracht werden sollen.

Dieses letztere Verfahren scheint auf den ersten Blick das kürzere. Aber es erinnert zu sehr an die heutige planlose Methode, den Molekeln die Strahlung abzulocken, indem man sie durch Wärme erschüttert, als dass es ganz befriedigen könnte. Die Methode der direkten Aufrechterhaltung wird vielleicht länger schlummern; sie mag noch weiter vom Ziele entfernt sein, aber es verbirgt sich in ihr ein tieferes Verständniss für die eigentliche Sachlage.

Dieses Verfahren scheitert vorläufig noch an ungenügender Frequenz; die Methode der Phosphorescenz scheitert an ungenügender Intensität.

VORLESUNGEN

(Die folgenden Vorlesungen stehen in Beziehung zu unserem Thema und sind der Bequemlichkeit halber diesem Buche angehängt. An einigen Stellen ist das Datum ihrer Entstehung in Betracht zu ziehen.)

VORLESUNG I

DER ZUSAMMENHANG VON ELEKTRICITÄT UND LICHT

Gehalten am 16. December 1880 in der London Institution

Von dem Augenblicke an, da ich es übernahm, in dem kurzen Zeitraum von 60 Minuten einen Gegenstand zu besprechen, dessen Inhalt so tief und ausgedehnt ist, dass selbst 60 Stunden zu einer eingehenden und erschöpfenden Behandlung desselben nicht ausreichen würden, hat mich das Erstaunen über meine eigene Kühnheit nicht verlassen.

Ich muss mich ganz darauf beschränken, einige der am meisten hervorragenden und typischen Punkte in der Beziehung zwischen Elektricität und Licht hervorzuheben und werde, um Zeit zu ersparen, mein Thema sofort in Angriff nehmen.

Wenn Jemand daran geht, die Beziehungen zwischen Elektricität und Licht auseinander zu setzen, so wird

man ihn naturgemässer und berechtigter Weise sofort mit den Fragen unterbrechen: Was verstehen Sie unter Elektricität — Was verstehen Sie unter Licht? Diese beiden Fragen möchte ich kurz zu beantworten suchen und bemerke dabei, dass ich bei der Beantwortung durchaus nicht bei meinen Zuhörern eine völlige Unkenntniss des Gegenstandes annehme, sondern eher das Gegentheil voraussetze; wenn ich also wohlbekannte und einfache Versuche vor Ihnen wiederhole, so müssen Sie sich erinnern, dass dieses zu dem Zwecke geschieht, Ihre Aufmerksamkeit auf deren wirkliche Bedeutung, nicht auf das äusserliche und oberflächliche Bild des Vorgangs zu lenken. Wenn ich über das Wesen der Schwerkraft heute mit Ihnen zu sprechen hätte, so würde ich Ihnen z. B. die allbekannte Erscheinung wieder vorführen, dass ein Stein zur Erde fällt.

Wir fragen also zuerst: Was ist Elektricität? und die einfache Antwort lautet: Wir wissen es nicht. Dies braucht uns aber nicht zu entmuthigen. Würde die Frage gestellt: Was ist Stoff? oder was ist Energie? so würden wir abermals antworten müssen: Man weiss es nicht.

Freilich sind die Bezeichnungen „Stoff" und „Energie" nur allgemeine Ausdrücke, sozusagen Ueberschriften, unter welche wir speciellere Erscheinungen einzureihen haben.

Würden wir gefragt: was ist Schwefel? oder was ist Selen? so würden wir zum Mindesten antworten können:

eine Art von Stoff, und wir würden daran gehen dürfen, deren Eigenschaften, d. h. die Art, wie sie auf unsere oder andere Körper einwirken, zu beschreiben.

Ferner auf die Frage: was ist Wärme? könnten wir antworten: sie ist eine Art der Energie, und könnten alsdann ihre Eigenart beschreiben, welche sie von andern Arten der Energie unterscheidet.

Allein auf die Frage: was ist Elektricität? haben wir keine fertige Antwort zu geben. Wir können weder behaupten, sie sei eine Art von Materie, noch können wir dieses bestreiten; andererseits können wir auch nicht bestimmt behaupten, sie sei eine Form der Energie, wenigstens würde ich geneigt sein, dieses zu bestreiten. Es ist möglich, dass Elektricität ein Ding für sich ist, gerade wie die Materie eines ist.

Trotz alledem kann ich Ihnen sagen, was ich unter Elektricität verstehe, indem ich Ihnen deren bekannte Wirkungsweise darlege.

Hier ist eine Batterie — das heisst eine Elektricitätspumpe —, sie wird Elektricität *weiter senden.* Am kommenden 20. Januar wird Ihnen Herr Ayrton wahrscheinlich sagen, dass die Batterie Elektricität *erzeuge;* allein ich hoffe, Sie werden sich dann erinnern, dass weder die Batterie noch irgend sonst eine Vorrichtung dieses zu thun vermag. In dem Sinne, in dem ich die Bezeichnung anwende, ist es ebenso unmöglich, Elektricität zu erzeugen, als es unmöglich ist, Materie zu erzeugen. Selbstverständlich weiss dies

Herr Ayrton sehr wohl; es ist nur eine Frage des Ausdrucks, d. h. dessen, was man unter dem Namen Elektricität zu verstehen hat.[1])

Ich möchte also, dass Sie diese Batterie, sowie alle elektrischen Maschinen und Batterien als eine Art von Elektricitätspumpe ansehen, welche Elektricität durch die Drähte treibt, ähnlich wie eine Wasserpumpe das Wasser durch Röhren treibt; Sie müssen sich aber klar machen, dass eine elektrische Pumpe ebensowenig im Stande ist, Elektricität zu fabriziren, als eine Wasserpumpe im Stande ist, Wasser zu fabriziren. Während nun der elektrische Strom im Gange ist, zeigt der Draht eine Reihe von Eigenschaften, welche man die Eigenschaften des Stroms nennt. (Hierbei zeigte der Vortragende nacheinander einen glühenden Platindraht, den elektrischen Bogen zwischen zwei Kohlenspitzen, den Funken einer Elektrisirmaschine und eines Induktionsapparates, sowie das Glühen innerhalb einer Geisler'schen Röhre. Ferner wurde ein grosser Nagel magnetisirt, indem man einen stromdurchflossenen Draht um ihn wickelte, und es wurden zwei Stromspulen aufgehängt, um zu zeigen, wie sie sich gegenseitig anzogen und abstiessen.)

[1]) Oder aueh was man unter dem Ausdruck *erzeugen* versteht. Der Titel von Herrn Ayrton's Vortrag lautet: „Die Erzeugung von Elektricität", und es lag mir daran, Verwahrung einzulegen gegen den Ausdruck „Erzeugung" als ob man von Hervorbringung oder Erzeugung von Elektricität in derselben Weise reden könne wie von der der Wärme.

Um einen Magneten zu haben, brauchen wir also nur einen Strom von Elektricität, der wirbelartig im Kreislauf herumfliesst. Ein Wirbel oder Wirbelstrom von Elektricität ist thatsächlich ein Magnet, und vice versa; und diese Wirbel haben die Macht, andere, vorher existirende Wirbel zu beeinflussen und anzuziehen, nach bestimmten Gesetzen, welche man die Gesetze des Magnetismus nennt; überdies haben sie die Macht, neue Wirbel in benachbarten Leitern zu erregen und abzustossen, entsprechend den Gesetzen des Diamagnetismus. Die Theorie der Wirkung ist bekannt, aber sowohl die Natur der Wirbel als die des einfachen elektrischen Stromes ist bis jetzt unbekannt.

(Hier wurde an einem grossen Elektromagneten gezeigt, wie im magnetischen Felde der Lichtbogen der Vacuum-Entladung eines Induktionsapparates rotirt. Fig. 24.)

Soviel wäre zu sagen über das, was sich ereignet, wenn Elektricität in Leitern weiter geführt wird; d. h. wenn sie sich fortbewegt wie ein Wasserstrom in einer Röhre oder wenn sie sich wie ein Wirbel im Kreislauf bewegt.

Es giebt aber noch eine andere Art von Erscheinungen, die gewöhnlich als von diesen verschieden und einer andern Klasse angehörig betrachtet werden, welche aber nicht so verschieden sind, als es erscheint; sie treten dann auf, wenn man die Pumpe mit einem Stück Glas oder irgend einem andern schlechten Leiter verbindet, und wenn man versucht, die Elektricität hindurch zu zwingen. Es gelingt wohl, einen Theil hindurch zu

treiben, aber die Elektricität strömt nicht mehr wie Wasser, das durch eine offene Röhre fliesst; vielmehr ist es, als ob die Röhre, durch eine Anzahl elastischer Zwischenwände oder Diaphragmen völlig verstopft würde. Das Wasser kann nicht vorwärts dringen ohne diese Diaphragmen zu verbiegen und zu spannen. Die verbogenen Zwischenwände werden sich aber wieder aufrichten und das Wasser zurückdrängen, sobald sich ihnen eine Möglichkeit dazu bietet. (Hier wurde das Laden einer Leydener Flasche gezeigt und das Modell Fig. 11 S. 71.) Als Hauptsache muss festgehalten werden, dass es elektrische Energie in zweierlei Formen, der statischen und der kinetischen, giebt, und dass es daher möglich ist, den raschen Wechsel von einer Form zur andern, den wir Schwingungen nennen, zu erhalten.

Nunmehr gehen wir über zu der zweiten Frage: was verstehen Sie unter Licht? Die erste und auf der Hand liegende Antwort lautet: das wissen wir Alle. In der That weiss es ein Jeder, der nicht geradezu blind ist, bis zu einem gewissen Grade. Wir haben ein besonderes Sinneswerkzeug für die Empfindung des Lichtes, wohingegen uns ein solches für die Elektricität fehlt. Trotzdem müssen wir bekennen, dass wir sehr wenig über die eigentliche Natur des Lichtes wissen — wenig mehr als über die der Elektricität. Aber wir wissen soviel, dass das Licht eine Art der Energie ist, und überdies eine Energie, welche rasch zwischen der statischen und kinetischen Form wechselt — dass es

thatsächlich eine besondere Art von Schwingungsenergie ist. Wir sind absolut sicher, dass Licht eine periodische Störung innerhalb irgend eines Mediums ist; periodisch in Bezug auf Raum und Zeit; d. h. dieselben Erscheinungen treten regelmässig zu derselben Zeit in bestimmten gleichmässigen Entfernungen auf, ebenso wie sie sich in bestimmten Zeitintervallen an denselben Stellen zeigen. Das Licht gehört also thatsächlich zu derjenigen Art von Bewegungen, welche die Mathematiker Undulations- oder Wellenbewegungen nennen.

Die Wellenbewegung an diesem Apparat (Powell's Wellen-Modell) entsteht aus der einfachen auf- und absteigenden Bewegung, welche man gewöhnlich mit dem Ausdruck „Welle" bezeichnet. Allein wenn der Mathematiker von einer Welle spricht, so bezeichnet er damit eine Störung, die sich durch eine bestimmte mathematische Formel darstellen lässt, nicht aber eine Auf- und Abbewegung oder etwas, was den Unebenheiten auf der Seeoberfläche gleicht. Die Bewegung der Seeoberfläche gehört zwar auch den Wellenbewegungen an, bildet aber nur eine besondere Art derselben; im gewöhnlichen Sprachgebrauch hat der Ausdruck Welle die Bedeutung dieser Bewegung und kaum je eine andere. Wenn man im gewöhnlichen Leben von einer Welle oder Wellenbewegung spricht, so denkt man sofort an ein Auf- und Absteigen, ja sogar an eine Brandung. Wenn wir aber die Behauptung aussprechen, die Form der Energie, welche *Licht* genannt wird, sei eine wellenförmige Be-

wegung, so wollen wir damit durchaus nicht sagen, dass sich dabei irgend etwas auf und ab bewege, oder dass die Bewegung, falls wir sie sehen könnten, in irgend einer Weise der Bewegung des Meeres ähnlich wäre. Vielmehr ist uns die Art der Bewegung unbekannt; wir wissen nicht einmal, ob eine Bewegung im gewöhnlichen Sinne des Wortes stattfindet.

Was haben wir nun, nach diesem Einblick in ihre Natur, über den Zusammenhang von Licht und Elektricität gelernt? Leider nur sehr wenig. Es beschränkt sich ungefähr auf Folgendes: Einerseits kann elektrische Energie in zwei Formen existiren: 1) In der statischen Form, wo Isolatoren in elektrische Spannung versetzt werden, indem man Elektricität in dieselben hineintreibt, wie bei der Leydener Flasche. Diese Spannung ist durch ihre Neigung zur Entladung und zur Arbeitsleistung eine Form der Energie. 2) In der kinetischen Form, wo Elektricität in einem Leiter sich körperlich fortbewegt oder sich in diesem Leiter als Wirbel im Kreise dreht. Diese elektrische Bewegung ist eine Form der Energie, weil Leiter und Wirbel sich gegenseitig anziehen oder abstossen und so Arbeit leisten.

Anderseits wissen wir, dass Licht der rasche Energiewechsel von einer Form zur anderen ist — von der statischen Form, in welcher das Medium gespannt wird, zur kinetischen Form, in welcher es sich bewegt. Es ist vielleicht möglich, dass die statische Form der Energie des Lichtes *elektro*statisch ist, d. h. dass die Spannung

des Mediums eine *elektrische* ist, und dass die kinetische Form der Energie des Lichtes *elektro*kinetisch ist, d. h. dass seine Bewegung nicht eine gewöhnliche, sondern eine elektrische Bewegung ist; und dass thatsächlich das Licht nicht eine materielle, sondern eine elektrische Schwingung ist.

Am 5. November 1879 starb in Cambridge ein Mann von höchster Begabung — einer solchen Begabung, wie sie nicht oft in einem Jahrhundert vorkommt — dessen Hauptwerk in der Feststellung dieser Thatsachen und in der Entdeckung des Zusammenhangs zwischen Licht und Elektricität bestand, und in dem Beweis — denn meiner Ansicht nach gab er diesen Beweis —, dass das Licht thatsächlich eine elektromagnetische Störung ist. Das allzu frühe Hinscheiden von James Clerk Maxwell ist ein unersetzlicher Verlust für die Wissenschaft, denn er war mit Untersuchungen beschäftigt, die zur Zeit kein Anderer hoffen darf, mit Erfolg zu erfassen und weiter zu führen. Glücklicher Weise erfolgte sein Tod erst nach dem Erscheinen seines Buches über Elektricität und Magnetismus. Es ist dies eines jener unsterblichen Werke, welche unsere Begriffe von dem menschlichen Geiste höher heben, ein Buch, welches nach dem Urtheil kompetenter Forscher neben Newton's „Principia" genannt zu werden verdient. Aber es ist nicht vollkommen wie die „Principia"; vieles darin ist noch im Rohzustand und bedarf der Durcharbeitung. Es enthält viele Druckfehler und Irrthümer und ein

Theil des zweiten Bandes ist inhaltlich so schwierig, dass er beinahe unverständlich zu nennen ist. Manche Notizen darin waren nur für seinen Privatgebrauch und nicht zur Veröffentlichung bestimmt. Denn heutzutage ist es beinahe unmöglich, ein Werk durch zwanzig oder dreissig Jahre im Innern still zur Reife zu bringen, wie Newton dies vor zweihundert und fünfzig Jahren gethan. Eine zweite Auflage wäre erschienen und manche Verbesserung der Form darin vorgenommen worden, wenn dem berühmten Verfasser ein längeres Leben vergönnt gewesen wäre.

Der Hauptbeweis für die elektromagnetische Theorie des Lichtes ist folgender: die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes ist oft gemessen worden und ist ziemlich genau bekannt; ebenso lässt sich aus elektrischen Messungen die Geschwindigkeit berechnen, mit der eine elektromagnetische Wellenstörung sich fortbewegen würde, wenn man eine solche hervorbringen könnte. Beide Geschwindigkeiten stimmen genau überein. Es ist dies die grosse, als „v" bekannte physikalische Konstante, welche viele Physiker gemessen haben und welche sie wahrscheinlich noch lange Zeit messen werden (§ 138).

Maxwell hat viele glänzende Entdeckungen gemacht, nicht nur auf dem Gebiete der Elektricität, sondern auch auf dem der Theorie von der Natur der Gase und auf dem der molekularen Physik im Allgemeinen; aber meiner Meinung nach gleicht keine an Tragweite und an künf-

tiger Bedeutung der eben erwähnten, dass das Licht eine elektrische Erscheinung ist.

Die erste Ahnung dieser grossen allgemeinen Thatsache fasste im Jahre 1845 Michael Faraday, jener Fürst unter allen experimentirenden Physikern. Es ist nicht klar, welche Gründe er für seine Vermuthung des Zusammenhanges von Licht und Elektricität hatte — wahrscheinlich waren sie ihm selbst nicht vollkommen bewusst, aber er scheint eine Art von Ueberzeugung gehabt zu haben, dass, wenn er nur lange genug Versuche anstellte, alle denkbaren Arten von Lichtstrahlen in allen denkbaren Richtungen durch elektrische oder magnetische Felder auf alle denkbaren Medien fallen zu lassen, so müsse er schliesslich irgend etwas finden. Und so machte er es; mit wahrhaft himmlischer Geduld und Ausdauer, die uns an die Art und Weise erinnert, mit welcher Kepler auf anderem Gebiete eine Annahme nach der anderen durchrechnete, verband Faraday Licht mit Elektricität oder Magnetismus auf jede nur mögliche Weise. Schliesslich wurde seine Mühe belohnt, und zwar durch einen ganz absonderlichen Erfolg. Dazu brauchte er zunächst einen sehr mächtigen Magneten, der sehr stark erregt wurde; danach mussten die beiden Pole so durchbohrt werden, dass durch die Löcher ein Lichtstrahl längs den magnetischen Kraftlinien hindurch gesandt werden konnte. Da gewöhnliches Licht sich als unbrauchbar erwies, musste ein Strahl von planpolarisirtem Licht beschafft und zwischen die Pole gesandt werden.

Damit war aber noch nichts erreicht, bis man schliesslich ein Stück von einem seltenen und von Faraday selbst entdeckten und hergestellten Material dazwischen brachte. Es ist dies eine Art von schwerem, borsaures Bleioxyd enthaltendem Glase, das sehr dicht ist und das völlig tadellos sein muss.

Nach Beendigung aller dieser Vorbereitungen ist der Erfolg nur der: wenn das polarisirte Licht durch einen Analysator aufgefangen und dieser so gestellt wird, dass er es auslöscht und das Gesichtsfeld vollständig verdunkelt, ehe der Magnet erregt wird, dann findet eine schwache, kaum bemerkbare Aufhellung statt, sobald die Verbindung mit der Batterie und die Erregung des Magneten erfolgt. Diese Helligkeit verschwindet sofort wieder, wenn der Analysator um ein Weniges gedreht wird. (Dieser Versuch wurde gezeigt.) Kein Wunder, dass Niemand dieses Resultat verstand. Faraday selbst verstand es gar nicht; er scheint geglaubt zu haben, dass die magnetischen Kraftlinien leuchtend, oder dass das Licht magnetisch geworden sei — kurz, er befand sich ganz im Dunkeln und hatte keine Ahnung von der wahren Bedeutung. Es war eine verfrühte Entdeckung, zu einer Zeit, wo die Wissenschaft noch nicht weit genug vorgeschritten war, um sie zu verstehen. Erst Sir William Thomson sprach kurz, aber klar, deren wichtige Folgerungen aus und Clerk Maxwell entwickelte sie danach noch weiter.

Das Princip dieses Versuches wurde alsdann mit

Hülfe eines mechanischen Modells erläutert. Es war dies ein Wheatstone'sches Photometer, bestehend aus einem Zahnrad, das auf der Innenseite eines befestigten äusseren Rades von doppeltem Durchmesser umlief, so dass eine an dem inneren Kreis befestigte Kugel eine Art von Ellipse beschrieb. Eine besondere Vorrichtung war vorgesehen, um die Kugel genau über dem Aussenrand des kleineren Rades einzustellen; sie beschreibt dann eine gerade Linie, den Durchmesser des grösseren Kreises, mit einer einzigen harmonischen Bewegung: und diese einfache Bewegung ist thatsächlich zusammengesetzt aus zwei gleichen entgegengesetzten Kreisbewegungen, nämlich der Umdrehung des Mittelpunktes des kleinen Rades und der Umdrehung der Kugel um diesen Mittelpunkt, die nach entgegengesetzter Richtung mit derselben Geschwindigkeit erfolgen.

Der ganze Apparat war derartig aufgestellt, dass er durch einen Griff und eine endlose Schraube nach beiden Richtungen hin langsam gedreht werden konnte; dadurch wurde die eine der Kreisbewegungen beschleunigt und die andere verzögert. Als Folge hiervon ward die Bahn der Kugel in Drehung versetzt, beschrieb ein etwas verwickeltes Hypocycloid, und stellte damit die Drehung der Schwingungsrichtung des Lichtes dar (§ 172).

Dieses ist der grundlegende Versuch, der wahrscheinlich den Anlass zu Clerk Maxwell's Theorie des Lichtes gab. Seither sind viele neue Thatsachen in den Beziehungen zwischen Elektricität und Licht entdeckt

worden, und in neuester Zeit kommen sie haufenweise zu Tage.

Faraday fand, dass ausser dem schweren Glase noch viele andere durchsichtige Media im magnetischen Felde dieselbe Erscheinung, obschon in geringerem Grade, hervorriefen; die sehr wichtige Thatsache, dass selbst Luft, wenn auch fast unmerklich, eine magnetische Drehung zeigt, ist kürzlich durch Röntgen und Kundt in Deutschland entdeckt worden.

Herr Kerr aus Glasgow dehnte den Versuch auf undurchsichtige Körper aus und zeigte, dass die Polarisationsebene des Lichtes bei seinem Durchgang durch magnetisirtes Eisen gedreht wird. Freilich muss das Eisenplättchen wegen seiner Undurchsichtigkeit ausserordentlich dünn sein; daher ist die Ablenkung sehr gering, wenn auch die dem Eisen innewohnende drehende Kraft unzweifelhaft sehr gross ist; überhaupt gelang Herrn Kerr der Nachweis nur durch sehr grosse Sorgfalt und Geschicklichkeit. Herr Fitzgerald aus Dublin hat die Frage mathematisch geprüft und gefunden, dass das von Herrn Kerr erreichte Resultat sich aus der Maxwellschen Theorie voraussagen liess.

Aus der Theorie folgt ferner, dass die für Licht durchlässigen Körper für Elektricität Nichtleiter oder Isolatoren sind elektrische Leiter aber nothwendiger Weise für Licht undurchdringlich sein müssen. Dieses bestätigt die einfache Beobachtung; Metalle sind die besten Leiter und zugleich die undurchsichtigsten Körper

die wir kennen; Isolatoren, wie Glas und Krystalle, sind durchsichtig, sobald sie genügend homogen sind; die merkwürdigen Untersuchungen von Herrn Graham Bell haben sogar gezeigt, dass das für unser Auge ganz undurchsichtige Ebonit für gewisse Arten von Strahlung wirklich durchsichtig und sogar beträchtlich durchsichtig ist.

(Hier wurde an mechanischen Modellen der Grund

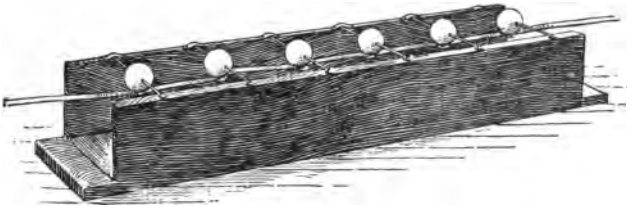


Fig. 66.

erläutert, warum durchsichtige Körper isoliren und warum gute Leiter undurchsichtig sind.)

Der eine Apparat, welcher einen dielektrischen Körper darstellt, ist bereits auf Fig. 8 abgebildet; Wellen durchlaufen ihn, sobald das Seil, auf dem die sämmtlichen elastisch befestigten Kugeln aufgereiht sind, in Schwingung versetzt wird.

Der andere Apparat, der einen metallischen Leiter darstellen soll, ist auf Fig. 66 abgebildet. Bei diesem gleiten die Holzkugeln auf glatten Messingstangen, die

durch ein Seil mit einander verbunden sind. Verschiebt man sie, so haben sie kein Bestreben, in ihre ursprüngliche Lage zurückzukehren. Schüttelt man das Seil, welches die Kugeln verbindet, so dringen die Wellen bis zu einer gewissen beschränkten Tiefe in das Medium ein, gehen aber nicht ganz hindurch.

(Beide Apparate wurden hinter einander gestellt und verbunden; die Wellen, welche längs des Seils durch den einen frei hindurchliefen, wurden von dem anderen theils aufgehoben, theils zurückgeworfen.)

Die Theorie führt zu dem weiteren Schlusse, dass die Geschwindigkeit des Lichtes in einem durchsichtigen Körper durch dessen elektrische Spannungskonstante beeinflusst werde; mit anderen Worten, dass dessen Brechungs-Index eine nahe, aber noch nicht ganz klar gestellte Beziehung zu seiner spezifischen Induktionsfähigkeit habe. Versuche haben diese Annahme theilweise, aber bis jetzt nur ungenügend bestätigt.

Es giebt aber gar manche, von der Theorie nicht vorausgesehene Ergebnisse, deren Zusammenhang mit ihr noch nicht klar gestellt ist. Es ist eine Thatsache, dass Licht, welches auf die Platinelektrode eines Voltameters fällt, hier einen Strom erzeugt; sie wurde meines Wissens zuerst durch Sir W. B. Grove beobachtet, jedenfalls von ihm in seiner „Correlation of Forces“ erwähnt. Bequerel und Robert Sabine haben dieselbe Erscheinung bei anderen Substanzen beobachtet, und jetzt sind die Versuche durch Herrn

Minchin auch auf fluorescirende und andere Körper ausgedehnt worden.

Zum Schlusse, — ich muss mich kurz fassen, — haben wir die merkwürdige Wirkung des Lichtes auf Selen. Diese Thatsache wurde durch einen Assistenten im Laboratorium von Herrn Willoughby Smith zufällig entdeckt: er bemerkte, dass ein Stück Selen die Elektricität viel besser leitet, wenn Licht darauf fällt, als wenn es im Dunkeln liegt. Das Licht einer Kerze genügt dafür, und bringt augenblicklich den Widerstand auf ein Fünftel des ursprünglichen Werthes.

Ich könnte Ihnen alle diese Erscheinungen vorführen, aber es ist nicht viel an ihnen zu sehen; als Phänomene sind sie unendlich interessant, aber als Experiment kaum mehr in die Augen fallend als Faraday's Versuch mit dem schweren Glase.

Es ist dasselbe Phänomen, welches, wie Sie wissen, Professor Graham Bell in seiner merkwürdigen und scharfsinnigen Erfindung, dem Photophon, angewendet hat. Durch die Freundlichkeit von Herrn Silvanus Thompson erhielt ich einige Zeichnungen, um Ihnen das Princip dieser Erfindung zu zeigen und Herr Shelford Bidwell hat die Güte gehabt, mir sein selbstverfertigtes Photophon zu leihen, das auf kurze Entfernungen vorzügliche Dienste thut.

Ich habe Ihre Zeit nun lange genug in Anspruch genommen; ich möchte nur noch auf das hindeuten, was uns wohl die nächste hervorragende Entdeckung bringen

dürfte; nämlich die Uebertragung von Licht durch Elektricität; ich meine damit die Uebertragung von Gegenden, Bildern und ähnlichen Gegenständen mittels des elektrischen Drahtes. Noch ist sie nicht gelungen; aber theoretisch scheint die Sache möglich und so wird die praktische Ausführung wohl nicht lange auf sich warten lassen.

VORLESUNG II

UEBER DEN AETHER UND SEINE FUNKTIONEN

Gehalten am 28. Dezember 1882 in der London Institution

Ich hoffe, dass keiner meiner Zuhörer durch den Druckfehler im Titel dieses Vortrages, den Wegfall des Artikels „der" vor dem Worte „Aether", auf den Gedanken gekommen sein wird, ich wollte Ihnen heute einen Vortrag chemischen Inhalts über das neueste Narkotisirungsmittel halten. Sie haben gewiss Alle verstanden, dass ich mit „Aether" *den* Aether meine, und dass *der* Aether jenes hypothetische Medium ist, von dem wir annehmen, dass es den sonst leeren Weltraum erfülle.

Die Annahme eines solchen Aethers ist durchaus keine neue Idee. Seitdem der menschliche Geist in Folge astronomischer Entdeckungen den Begriff des unendlichen Weltraums zu fassen gelernt hat, musste die Frage entstehen: Was ist in diesem Raum enthalten?

Ist er gefüllt oder ist er leer? und diese Frage wurde durch die Metaphysiker auf verschiedene Weise beantwortet. Für die Einen war das Vacuum eine Unmöglichkeit, die nirgend bestehen könne, weil die Natur ein solches nicht dulde. Andere fanden, ein leerer Raum könne deshalb nicht bestehen, weil er einer leeren Blase gleich in sich zusammenfallen müsse, falls er nicht durch ein stoffliches Etwas auseinander gehalten werde. Mit andern Worten, das Vorhandensein von Materie war für diese die Bedingung der räumlichen Ausdehnung. Wieder Andere sagten, die Annahme eines Vacuum sei zwar sehr anfechtbar, müsse aber doch bestehen bleiben, weil nur im leeren Raum eine Fortbewegung der Weltkörper denkbar werde. Es würde, wenn der ganze Raum mit Materie gefüllt wäre, Alles fest zusammen gedrängt sein, sodass weder freie Anziehung noch freie Bewegung der Körper um einander stattfinden könne.

Es giebt auch heutigen Tages noch Physiker, die sich bei der Annahme beruhigen, die Materie bestehe aus kleinen, im umgekehrten Verhältniss ihrer Entfernungen aufeinander einwirkenden Theilchen: diese Forscher sind zufrieden, wenn eine Erscheinung als Fernwirkung durch den leeren Raum zu erklären ist. Weiter zu gehen oder tiefer in die Natur und die Ursache von solchen Wirkungen einzudringen, liegt nicht innerhalb ihres Strebens.[1])

[1]) Als Beispiel sei auf einen im Januarheft des Phil. Mag. 1883 erschienenen Artikel von Hrn. Walter Browne verwiesen.

Sollen metaphysische Folgerungen irgend welche Bedeutung oder Berechtigung haben, so werden sie immer ein unbewusster Appell an die Erfahrung sein müssen. Es besinnt sich z. B. Jemand darüber, ob gewisse Zustände für ihn begreiflich sind oder nicht; sind sie ihm *nicht* begreiflich, so kommt er a priori zu dem Schlusse, dass diese Zustände überhaupt nicht existiren. Der Schluss hat *einige* Berechtigung, aber ob viel oder wenig, hängt theils von dem Gegenstand der Frage, die einfach oder verwickelt sein kann, theils davon ab, über welchen Grad von geistiger Entwicklung und über welche Fülle von Erfahrung der Fragesteller verfügt.

Wenn ein Lehrsatz über eine verhältnissmässig einfache und grundlegende Materie, für einen geschulten Denker oder mehrere solcher absolut *undenkbar* erscheint, so ist dies ein Beweis dafür, — und zwar kann es als gültiger Beweis gelten, — dass dieser undenkbare Zustand nicht existirt, weil, wenn er existirte, er selbst oder etwas ihm Aehnliches in den Bereich der Erfahrung getreten sein müsste. Wir haben auch keinen anderen Beweis für den Satz, dass zwei gerade Linien nicht einen Raum einschliessen können, oder dass die Summe der Winkel eines Dreiecks gleich zwei rechten Winkeln ist.

Trotzdem ist ein solcher Schluss nicht endgültig, denn die Undenkbarkeit einer Sache beweist nur, dass etwas ihr Aehnliches noch nicht innerhalb unserer Erfahrung vorgekommen ist, und dieses beweist wieder

nichts über das Bestehen oder Nichtbestehen einer Sache, unsere Erfahrung von ähnlichen Dingen müsste denn so ausgedehnt sein, dass diese Sache, wenn sie überhaupt existirte, unmöglich hätte gänzlich übersehen werden können.

Die Erfahrung eines Kindes oder eines Hundes in Bezug auf alltägliche Naturerscheinungen bedeuten so viel wie nichts. Ebenso werthlos ist die Erfahrung der Menschheit gegenüber von erhabeneren Phänomenen, von denen sie bisher noch nichts weiss. Es wäre aber sehr thöricht und anmaassend, das Bestehen solcher Phänomene zu leugnen, nur weil sie uns unbegreiflich erscheinen. Sie müssen ja unbegreiflich sein.

Eine Erscheinung ist es vor Allem, mit der die Menschheit seit undenklichen Zeiten vertraut ist, und über welche sie grössere Mengen der Erfahrung angesammelt hat, als auf irgend einem anderen Gebiete: es ist dies *die Wirkung, die ein Körper auf einen anderen ausübt;* sowohl die Einwirkung von Kraft von einem Körper auf den anderen, als die Uebertragung von Bewegung und Energie von einem Körper auf den anderen, kurz, jede erdenkliche Art der Wirkung, die ein Körper auf einen anderen belebten oder unbelebten Körper hervorbringen kann. So die Wirkung eines Menschen auf den Baum, den er umhaut, auf den Speer den er wirft, auf den Bogen, den er spannt; so die Wirkung des Bogens auf den Pfeil, des Schiesspulvers auf die Kugel, des Pferdes auf den Wagen; ferner die

Wirkung der Erde auf den Mond, des Magneten auf das Eisen. Jede Art der Handlung, die wir mit Bewusstsein vollziehen, kann als Erläuterung für die Wirkung eines Körpers auf den anderen gelten.

Nun möchte ich, gestützt auf den ganzen Schatz unserer Erfahrungen, die Frage stellen: Ist nicht die direkte Wirkung eines Körpers auf den anderen durch den leeren Raum, ohne jede Möglichkeit des Verkehrs zwischen beiden Körpern, etwas absolut Undenkbares? Unsere Antwort kann nicht ohne Weiteres und nicht ohne das reiflichste Nachdenken erfolgen. Dann werden wir uns klar werden, dass eine Erscheinung uns einfach und verständlich vorkommt, sobald die Wirkung eines Körpers auf den anderen durch wahrnehmbare Berührung erfolgt ist; dass wir uns aber sofort und nothgedrungen nach einem verbindenden Medium umsehen, sobald die Wirkung eines Körpers auf den anderen scheinbar aus der Ferne erfolgt.

Tanzt eine Marionette, durch eine leitende Hand geführt, so wird jedes intelligente Kind sich nach dem führenden Drahte umsehen; kann es aber weder einen Draht noch etwas Entsprechendes entdecken, so wird es die ganze Sache unheimlich und spukhaft finden. Alle Zauberkünste vergangener Zeiten waren im Grunde genommen der Versuch, Wirkungen ohne die entsprechenden Ursachen herbeizuführen, Paläste zu bauen durch Drehen eines Ringes oder Reiben einer Lampe, Berge zu versetzen durch einen Wunsch, statt durch

Hacken und Spaten, und im Allgemeinen Wirkungen auszuüben, ohne jede wirkliche Verbindung zwischen den Dingen. Heutzutage glauben wir nicht mehr an dererlei Zaubereien und beweisen damit, dass die Menschheit jetzt die Ueberzeugung hat, Wirkungen ohne Ursache seien nicht denkbar und Wirkungen aus der Ferne unmöglich.

Wollte man für die Wirkung eines Pferdes auf einen Wagen die Erklärung geben, es bestehe eine Anziehung zwischen beiden, die nach einer hohen Potenz der Entfernung wirke — so würde man damit keine Unwahrheit sagen — man könnte ja die Thatsache auf diese Weise erklären, es wäre aber eine jämmerlich lahme Erklärung; und jeder, der einfach auf die Wagenspur zeigte, würde dem Grund der Sache viel näher kommen. Dasselbe beim Magneten und seiner Anziehung auf einen entfernten magnetischen Pol. Wenn man sagt, es bestehe eine Anziehung im umgekehrten Kubus der Entfernung zwischen beiden, so ist dies wohl wahr, aber es ist nicht die ganze Wahrheit, und wir wären sehr froh, wenn uns Jemand auch hier die Spur zeigte, denn wir fühlen, dass eine Spur vorhanden sein muss.

Man mag sich noch so sehr bemühen, sich eine klare Vorstellung zu machen, wie ein Körper auf einen andern wirkt, ohne dass ein Mittel zur Verbindung zwischen beiden vorhanden ist; man wird es aufgeben müssen. In den meisten Fällen sucht man unwillkürlich nach einem Medium; geschieht dies nicht immer, z. B.

nicht bei einem herabfallenden Gewicht oder bei magnetischer Anziehung, so rührt das daher, dass die Gewohnheit uns dumm und stumpf gemacht hat in Bezug auf die wirkliche Natur dieser Kräfte.

Wenn wir einen Wagen bergab rollen sehen ohne einen sichtbaren Motor, so müssten wir ihn eigentlich mit derselben staunenden Neugier betrachten, die ein Chinese in Chicago äusserte, als er den Wagen einer Seilbahn durch die Strassen fahren sah. Bei einem solchen Wagen liegt das Seil in einer unterirdischen Röhre. Das Verbindungsstück zwischen Wagen und Seil tritt durch einen engen Schlitz aus der Röhre und ist kaum sichtbar. Der Chinese betrachtete den Wagen eine Weile mit offnem Mund in starrem Erstaunen und that dann den denkwürdigen Ausspruch: „Nicht geschoben, nicht gezogen — fährt wie toll." Er war ein Philosoph, dieser Chinese!

Denken Sie daran: sobald wir etwas sich bewegen sehen, suchen wir nach dem Seile, sei es nun sichtbar oder unsichtbar; denn ohne Schieben und Ziehen ist eine Wirkung nicht möglich. Ueberlegen Sie ferner was „Ziehen" bedeutet, so wird es sich als „Schieben" erweisen. Um einen Gegenstand zu sich heranzuziehen, müssen Sie den Finger dahinter legen und ihn heranschieben; man sagt von einem Pferd, es „ziehe" einen Wagen, thatsächlich „schiebt" es die Halfter; eine Lokomotive schiebt einen Wagen mittels eines Hakens und einer Oese — und so weiter.

Es besteht ferner die sehr wichtige und schwierige Frage, warum die Theile eines Körpers zusammenhängen, und warum, wenn Sie einen Theil vorwärts schieben, die übrigen Theile nachfolgen. Die Kohäsion ist eine sehr auffallende Thatsache, und eine Erklärung wäre sehr zu wünschen. Ich werde späterhin noch Einiges über diesen Gegenstand zu sagen haben, für jetzt haben wir uns damit zu begnügen, von der Richtung, in der eine Erklärung möglich erscheint, Kenntniss zu nehmen. Wir können nicht eingehender über jene uns noch unbekannten Wirkungen sprechen; aber in Bezug auf solche, die verhältnissmässig einfach und verständlich sind, dürfen wir den allgemeinen Satz aufstellen: Die einzige Art der direkten Einwirkung auf einen Körper besteht darin, dass man ihn von hinten schiebt.

Ehe zwei Körper auf einander einwirken können, muss Kontakt zwischen ihnen stattfinden; und wenn sie nicht in direktem Kontakt mit einander sind, müssen sie in Kontakt mit einem dritten Körper stehen, der das Verbindungsmittel zwischen ihnen — das Seil — bildet.

Denken Sie sich nun einmal den schwierigsten Fall, dass ein lebendiger Körper auf einen andern einwirkt, ohne ihn zu berühren. Um z. B. die Aufmerksamkeit eines Hundes zu erregen, giebt es verschiedene Methoden. Erstens kann man ihn mit einem Stock berühren, zweitens kann man einen Stein nach ihm werfen, drittens kann man ihn rufen oder ihm pfeifen,

viertens ihn durch eine Geste oder ein Zeichen heranlocken, oder, was auf dasselbe herauskommt, mittels eines Spiegels einen Sonnenstrahl in sein Auge lenken. Bei den beiden ersten Methoden sind die Media sehr wahrnehmbare, der Stock und der Stein; bei der dritten Art, dem Rufen und Pfeifen, ist das Medium nicht sichtbar und einem Wilden könnte der Fall wie eine Wirkung aus der Ferne erscheinen; uns ist natürlich bekannt, dass die Luft das Medium ist, und dass, wenn sie entfernt würde, die Möglichkeit einer Mittheilung mit Hülfe des Schalles aufhören würde. Dagegen wird die Brauchbarkeit der vierten oder optischen Methode mit dem Fehlen der Luft nicht aufhören, denn der Hund kann im luftleeren Raum vollkommen gut sehen, wenngleich er nicht hören kann; welches Medium ihm hier den Eindruck übermittelt, wissen wir viel weniger sicher. Mittels eines solchen Mediums wird der Erde das Sonnenlicht durch den leeren planetarischen Raum zugeführt.

Die einzigen noch übrigen typischen Methoden auf den Hund einzuwirken, wären die elektrische oder magnetische Anziehung oder der thierische Magnetismus. Ich hoffe, Sie würden sich auch hierbei nach einem Medium, das die Eindrücke übermittelt, umsehen, in der Gewissheit, dass hier, wie in den früheren Fällen, ein solches vorhanden sein müsse.

Lassen wir aber diese subtilen und geheimnissvollen Kommunikationsmittel bei Seite und kehren wir zu den

zwei einfachsten — dem Stock und dem Stein — zurück. *Diese beiden vertreten die einzigen fundamentalen Formen der Verbindung zwischen räumlich von einander entfernten Körpern.* Wir sind zu der Annahme gezwungen, dass jede verborgene Wirkung sich schliesslich als zur einen oder andern dieser beiden Formen gehörig erweisen wird. Der Stock vertritt die Verbindung durch die Kontinuität der Substanz, der Stein die Verbindung durch thatsächliche Fortführung von Stoff, oder, wie ich den Vorgang nennen will, die Projektil-Methode. Wir kennen keine andern Arten für die Wirkung eines Körpers auf den andern, als diese: entweder durch die Kontinuität der Substanz oder durch Projektile.

Ein anschauliches und wohlbegründetes Beispiel der Projektil-Methode ist uns bekannt: die Fortpflanzung eines *Druckes* durch Gase. Ein Gas besteht aus vollkommen unabhängigen Theilchen, und die einzige Art, wie diese gegenseitig auf einander wirken können, besteht in *Stössen.* Der Luftdruck ist ein Bombardement von Theilchen, und die Einwirkungen werden innerhalb der Gase wie durch eine Reihe von Elfenbeinkugeln weitergeführt. Die Fortbewegung des Schalles findet in der Weise statt, dass jedes Theilchen einen Anstoss empfängt, den es dem nächsten weiter giebt, und die Schlusswirkung ist ziemlich dieselbe, als ob das zuerst angestossene Theilchen durch die ganze Entfernung geschleudert worden wäre.

Diese Erklärung für das Verhalten der Gase ist

so einfach und befriedigend und überdies so sicher richtig, dass wir uns wohl die Frage vorlegen dürfen, ob diese Theorie der Projektile nicht den Schlüssel zum ganzen Weltall abgeben könne? Ob nicht jede mögliche Art der Wirkungen zurückgeführt werden dürfe auf die Hypothese, dass die Atome sich in allen erdenklichen Richtungen vollkommen willkürlich umhertreiben, dass sie vollkommen unabhängig von einander sind, ausser wenn ein Zusammenstoss zwischen ihnen erfolgt? Wir haben auch bereits Atom-Theorien für das Licht und für die Gravitation; beide erklären die betreffenden Phänomene durch das Bombardement von Theilchen. Eine solche Atom-Theorie bietet jedoch für die Schwerkraft viele Schwierigkeiten, denn sie zeigt nicht, warum z. B. das Gewicht eines Tellers dasselbe bleibt, einerlei, ob er längs oder quer in den Strom der Atome gebracht wird; auch ist es verwunderlich — bei dieser wie bei jeder anderen Theorie — dass das Gewicht eines Körpers in festem, flüssigem und gasförmigem Zustand unverändert bleibt. Man hat das Problem der Kohäsion durch dieselbe Hypothese zu erklären versucht; allein, waren die Schwierigkeiten vorher schon gross genug, so wurden sie durch diese Erklärung einfach unabsehbar. Meiner Ansicht nach ist es nur mit Hülfe einer unwahrscheinlichen und gänzlich verdrehten Hypothese möglich, alle Wirkungen im Weltall auf ein blosses Zusammenprallen kleinster Theilchen zurückzuführen.

Auch ist es schwer zu fassen, welcher Art die Atome sein sollen und wie sie an- und voneinander prallen sollen, ohne dem Druck nachzugeben und ohne dann wieder zurückzuspringen wie elastische Kugeln. Es ist diese Elasticität äusserst harter Theilchen kaum begreiflich. Wenn aber die Atome nicht wirklich hart sind, sondern elastisch und nachgiebig, wenn sie nach demselben Gesetze wie Elfenbeinkugeln von einander abprallen, woraus sollen sie dann bestehen? Wir werden wieder von vorne anfangen müssen, um die Kohäsion und Elasticität der einzelnen Theile eines Atoms zu erklären.

Je mehr wir über den Gegenstand nachdenken, desto weniger können wir die Annahme festhalten, der Stoss sei eine genügende Erklärung für alle Wirkungen. Lassen wir aber die Annahme fallen, so müssen wir zu der anderen Hypothese — der einzigen, die uns bleibt — greifen: dass alle Verbindung durch ein kontinuirliches Medium stattfindet.

Wir müssen damit anfangen, ein solches kontinuirliches Medium zwischen den Theilchen zu denken: Eine Substanz, in der die Theilchen eingebettet sind, die in sämmtliche Zwischenräume der Theilchen eindringt und ausserhalb bis an die äussersten Grenzen des Raums reicht. Dieses zugegeben, werden die Schwierigkeiten rasch verschwinden. Wir haben jetzt den dauernden Kontakt zwischen den Theilchen der Körper; empfängt eines

derselben einen Anstoss, so wird den anderen naturgemäss die Bewegung mitgetheilt. Die Gasatome stossen nach wie vor aneinander an; der Stoss hat nun aber eine andere Bedeutung für uns.

Die Schwerkraft wird erklärlich durch Druckunterschiede innerhalb des Mediums, hervorgerufen durch eine noch unverständliche Wirkung zwischen diesem und der Materie (siehe S. 460). Auch die Kohäsion ist wahrscheinlich auf solche Weise zu erklären.

Das Licht besteht in Schwingungen oder Wellen im Medium; und die Wahrscheinlichkeit wächst, dass Elektricität eine Erscheinungsart eines Theiles des Mediums selbst ist.

Alle modernen Physiker haben das Medium als eine Nothwendigkeit anerkannt, denn ohne ein solches tasten wir völlig im Dunkeln, mit dem Medium aber haben wir eine Lösung, die, wenn wir sie richtig verwerthen, uns vielleicht in die innersten Geheimnisse der Natur einführen wird. Zwar ist bis jetzt diese Theorie noch wenig ausgebaut, ich möchte jedoch versuchen, Ihnen wenigstens die Richtung zu zeigen, in der die heutige Wissenschaft arbeitet.

Es ist ziemlich gleichgültig, welchen Namen wir diesem Medium geben, aber die Bezeichnung „Aether" ist so gut wie irgend eine andere.

So viel wir wissen, scheint dieser Aether ein vollkommen homogener, inkompressibler, zusammenhängender Körper zu sein, der sich nicht in einfache Elemente

oder Atome auflösen lässt; er ist thatsächlich kontinuirlich, nicht molekular. Wir kennen keinen andern Körper, dem wir diese Eigenschaft zuschreiben könnten, daher muss der Aether etwas Anderes sein als gewöhnliche Materie. Es wird uns nicht sehr schwer werden, uns eine kontinuirliche Substanz vorzustellen, denn auch die molekulare und poröse Beschaffenheit der gewöhnlichen Materie ist für unsere Sinne nicht wahrnehmbar; wir kennen sie nur in Folge einer ziemlich schwierigen Schlussfolgerung.

Der Aether ist theils als Fluidum, theils als Flüssigkeit und theils auch als fester Körper bezeichnet worden; man hat ihn seiner Unnachgiebigkeit wegen mit einer gallertartigen Masse verglichen; aber alle diese Namen taugen nicht viel; sie dienen sämmtlich für molekulare Zusammensetzungen und sind daher auf den Aether nicht anwendbar. Denken wir einfach und ausschliesslich an ein zusammenhängendes, reibungsloses, mit Beharrungsvermögen ausgestattetes Medium. Das Unbestimmte dieses Begriffes wird bei der Unvollkommenheit unseres heutigen Wissens gerade das Richtige sein.

Suchen wir nun die Idee einer vollkommen zusammenhängenden, feinen, inkompressiblen Substanz in uns zu gestalten. Sie erfüllt den ganzen Raum, dringt zwischen die Molekeln aller Materie, bettet diese Molekeln in sich ein und verbindet sie unter einander. Wir haben sie uns als das *eine allumfassende* Medium zu denken,

durch das sich alle Wirkung zwischen den Körpern vollzieht. Seine Funktion besteht darin, alle Bewegung und Energie zu übertragen.

Beschäftigen wir uns zunächst mit der Fortpflanzung des Lichtes.

Der Schall wird durch Bewegung und direkten Zusammenstoss von Atomen der gewöhnlichen Materie fortgepflanzt. Beim Licht ist dies nicht der Fall. Wie wissen wir das?

1) Durch seine Geschwindigkeit, die 3×10^{10} cm pro Sekunde beträgt. Gewöhnliche Materie kann diese Geschwindigkeit nicht erreichen.

2) Durch die Art seiner Schwingungen, wie diese in den Erscheinungen der Polarisirung zu Tage treten.

Die Schwingungen des Lichtes sind nicht derart, dass sie durch eine Anzahl einzelner Molekeln mitgetheilt werden können. Sollten Molekeln überhaupt damit zu thun haben, so müssten es solche sein, die zu einem festen, d. h. starren Körper vereinigt sind. Unter Starrheit verstehen wir Widerstand gegen zerrende oder scheerende Spannung, d. h. gegen Veränderung der Form. Man nennt sie auch *Formelasticität.* Dadurch dass er die Eigenschaft der Starrheit besitzt, unterscheidet sich ein fester Körper von einer Flüssigkeit. Um Schwingungen überhaupt mittheilen zu können, muss ein Körper Beharrungsvermögen besitzen; transversale Schwingungen im Besonderen können nur durch einen starren Körper mitgetheilt werden. Alle Materie

besitzt Beharrungsvermögen, allein Flüssigkeiten besitzen nur Elasticität des Volumens und können deshalb nur Longitudinalschwingungen mittheilen. Licht besteht aus transversalen Schwingungen. Nun sind aber Luft und Wasser nicht starr und sind trotzdem durchlässig für transversale Schwingungen, d. h. sie übertragen sie; also muss es der Aether in ihrem Innern sein, der die Bewegung thatsächlich weiterführt, und der Aether muss Eigenschaften besitzen, die wir bei gewöhnlicher Materie *Beharrungsvermögen* und *Starrheit* nennen würden. Auch die allerdünnste Luft kann diese Eigenschaften nicht besitzen, also muss der Aether ein besonderer Körper sein. Allerdings kann Luft im planetarischen Raum, ja sogar in der Unendlichkeit, *vorhanden* sein, wenn aber, dann ist sie fast unendlich verdünnt im Verhältniss zum Aether. Die Dichtigkeit der Atmosphäre auf jeder beliebigen Höhe über der Erdoberfläche ist leicht zu berechnen, sobald man annimmt, dass keine Körper vorhanden sind und die Temperatur konstant ist. (Alle folgenden Zahlenangaben sind in C.G.S.-Einheiten gemacht.)

Die Dichtigkeit der Atmosphäre in einer Entfernung von n Erdradien vom Erdmittelpunkte, ist gleich einem Viertel der Dichtigkeit hier, dividirt durch $10^{350\frac{n-1}{n}}$.

Danach würde die atmosphärische Dichtigkeit schon in der Höhe von 6000 Kilometern über der Erdoberfläche eine Summe ergeben mit 127 Stellen hinter dem

Komma, ehe nur die wirklichen Zahlen beginnen.[1]) Andererseits hat Sir William Thomson die Dichtigkeit des Aethers berechnet nach den Ergebnissen der Pouillet'schen Versuche über die Energie des Sonnenlichtes, und nach einer zu rechtfertigenden Annahme über die Schwingungsweite. Danach beträgt die Dichtigkeit des Aethers ungefähr 10^{-22}, ein Werth mit nur etwa 21 Stellen vor den wirklichen Zahlen. Die Luft, die im planetarischen Raum vorhanden ist, kommt somit garnicht in Betracht; die Dichtigkeit des dort vorhandenen Aethers ist, obwohl an sich gering, im Vergleich zu ihr doch ungeheuer. (Siehe auch S. 293.)

Nachdem so die Dichtigkeit des Aethers einmal gegeben ist, folgt dessen Starrheit unmittelbar daraus. Denn das Verhältniss der Starrheit zur Dichtigkeit ist das Quadrat der transversalen Wellengeschwindigkeit, also für den Aether $(3 \times 10^{10})^2$. Folglich beträgt die Starrheit des Aethers 9×10^{-2} d. h. ungefähr $^1/_{11}$. Der starrste feste Körper, den wir kennen, ist Stahl; verglichen mit dessen Starrheit, die 8×10^{11} beträgt, ist die des Aethers verschwindend. Aber weder Stahl

[1]) Ich habe diese Behauptung hier stehen lassen, denn es ist eine von grosser Autorität getragene Idee, dass die Atmosphäre keine Grenze habe. Mir will es dagegen viel vernünftiger erscheinen anzuuehmen, dass bei einer gewissen Höhe, (die unter der Annahme eines durch vollständige Mischung d. h. Konvektion bedingten Gleichgewichtszustandes 26—27 Kilom. beträgt, wahrscheinlich aber wegen der grossen Zähigkeit der Luft viel grösser ist) eine freie Oberfläche existirt, wenn auch mit sehr geringer Dichtigkeit.

noch Glas könnten, ihrer grossen Dichtigkeit wegen, Schwingungen übertragen, deren Geschwindigkeit annähernd so gross wäre, wie die des Lichtes. Crownglas kann transversale Schwingungen mit der Geschwindigkeit von einer halben Million Centimeter pro Sekunde verbreiten, was immerhin eine beträchtliche Geschwindigkeit ist. Die des Aethers innerhalb von Glas ist jedoch 40 000 Mal grösser, beträgt somit 20 000 Mill. Centimeter pro Sekunde.

Der Aether ausserhalb des Glases leistet noch mehr; denn hier beträgt die Geschwindigkeit 30 000 Millionen pro Sekunde. Nun entsteht die Frage: Was geht mit dem Aether im Innern des Glases vor, damit die Fortpflanzung der Wellen um ein Drittel hinter der normalen Geschwindigkeit zurückbleibt? Ist der Aether dichter oder ist er weniger starr als freier Aether geworden? Dieses ist schwer zu sagen, jedenfalls aber steht fest, dass der Aether irgendwie durch die unmittelbare Nachbarschaft von grober Materie beeinflusst wird. Es scheint, dass er im Innern derselben im Verhältniss zur Dichtigkeit der Materie verdichtet wird. Fresnel stellte die Hypothese auf, dass der Aether im Innern der Materie thatsächlich dichter sei, dass eine Art von Anziehung zwischen dem Aether und den Molekeln der Materie bestehe, welche eine Anhäufung oder ein Festhalten von Aether rings um jedes Atom herbeiführe, und dass dieser neu hinzukommende oder gebundene Aether zur Materie gehöre und mit ihr vereint

sich bewege. Die *Starrheit* ist nach Fresnel dieselbe bei gebundenem wie bei freiem Aether; eine Ausnahme findet nur bei einigen Krystallen statt.

Wenn man sich etwas Derartiges überhaupt vorstellen kann, so fällt es nicht schwer, die verhältnissmässige Dichtigkeit des gebundenen Aethers zu bestimmen. Denn das umgekehrte Verhältniss der Geschwindigkeiten des Lichts ist n (der Brechungsindex); und die Dichtigkeit verhält sich umgekehrt wie das Quadrat der Geschwindigkeit; daher ist das Dichtigkeitsmass n^2. Setzt man die Dichtigkeit des Aethers im freien Raum gleich 1, so ist die Dichtigkeit des Aethers im Innern der Materie gleich n^2, und die Dichtigkeit der gebundenen Theile des Aethers $n^2 - 1$.

Dies Alles mag sehr phantastisch klingen, aber irgend eine derartige Thatsache, wenn auch wahrscheinlich nicht genau die hier auseinandergesetzte, liegt gewiss den Dingen zu Grunde. Wenigstens ist die Thatsache genügend festgestellt und durch direkte Versuche erwiesen, dass der $\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$ betragende Theil des im Innern der Materie befindlichen Aethers an diese gebunden ist und sich mit ihr bewegt, während der übrige, $\frac{1}{n^2}$ betragende Theil frei ist und frei durch alle Poren dringt (§ 118).

Ueberlegen Sie sich den Einfluss des Windes auf den Schall. Der Schall geht durch die Luft mit einer

gewissen endlichen Geschwindigkeit, die davon abhängt, wie gross die durchschnittliche Geschwindigkeit der umherfliegenden Atome ist und wie schnell daher diese Atome den empfangenen Stoss weiterzugeben vermögen. Trägt ein Wind sämmtliche Atome in einer bestimmten Richtung fort, so wird sich der Schall nach dieser Richtung schneller fortpflanzen als nach der entgegengesetzten. Die Fortpflanzung des Schalles erfolgt also rascher mit dem Wind als gegen ihn. Ist es beim Licht ebenso? Geht das Licht auch schneller mit dem Wind? Das wird ganz davon abhängen, ob der Aether mit der Luft fortgerissen wird. Ist dem so, so wird seine Bewegung dem Licht etwas vorwärts helfen; bleibt der Aether aber in Ruhe, so vermag weder die Bewegung der Luft noch die der Materie das Licht irgendwie zu beeinflussen. Nach Fresnel's Hypothese befindet sich der Aether jedoch weder gänzlich in Ruhe noch gänzlich in Bewegung. Der freie Aether ist in Ruhe; der gebundene in Bewegung, und deshalb muss zu der Geschwindigkeit des Lichtes, das mit dem Winde geht, $\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$ von der Geschwindigkeit des Windes hinzuaddirt werden — eine unendlich kleine Zahl in Bezug auf Luft, deren n kaum grösser ist als 1. Bei Wasser jedoch beträgt der Antheil $^7/_{16}$, und Fizeau hielt es daher für möglich, ihn nachzuweisen. Mittels eines fein ersonnenen und erfolgreich durchgeführten Versuchs gelang es ihm, den Beweis zu liefern, dass, wenn Licht mit einem

Wasserstrom geht, $^7/_{16}$ von der Geschwindigkeit des Wassers zu der des Lichtes hinzukommen; geht das Licht gegen den Strom, dann muss dieselbe Menge subtrahirt werden und wir erhalten als Resultat die wirkliche Geschwindigkeit des Lichtes im freien Raum.

Arago schlug einen anderen Versuch vor. Licht, das durch ein Prisma fällt, wird von seiner Bahn abgelenkt, weil seine Geschwindigkeit innerhalb des Glases vermindert wird; die Grösse der Ablenkung hängt genau ab von der Verzögerung. Man denke sich nun ein schnell durch den Raum dahingetragenes Prisma, das dem schnellsten uns zugänglichen Transportmittel, der Erddrehung, folgend, sich mit einer Geschwindigkeit von 30 Kilometern pro Sekunde fortbewegt. Strömt der ganze Aether frei durch das Glas, so wird das durch das Prisma fallende Licht weniger aufgehalten werden, wenn es mit dem Aether, als wenn es gegen den Aether geht, und die Ablenkung muss eine verschiedene sein.

Maxwell unternahm diesen Versuch in sehr sorgfältiger Weise, konnte jedoch keine Differenz finden. Wäre der gesammte Aether frei, so müsste eine Differenz sich zeigen; wäre der gesammte Aether gebunden, so müsste eine entgegengesetzte Differenz vorhanden sein. Nach Fresnel's Hypothese darf jedoch gar keine Differenz gefunden werden, denn hiernach ruft ja nicht der freie Aether, der sich in relativer Bewegung be-

findet, sondern der gebundene Aether die Brechung hervor. Dieser aber befindet sich relativ zum Glase in Ruhe und durchströmt es gar nicht. Danach bleibt die Brechung dieselbe, gleichviel ob das Prisma ruhig daliegt oder ob es sich durch den Weltraum bewegt.[1])

Ein in den Aether eingebettetes Atom schwingt und sendet Wellen nach allen Richtungen aus; die Wellenlänge hängt von der Schwingungsperiode ab, und verschiedene Wellenlängen erwecken verschiedene Farbeneindrücke. Durch den freien Aether scheinen sich alle Arten von Wellen mit derselben Geschwindigkeit fortzubewegen, nicht aber durch den gebundenen Aether. Innerhalb der Materie werden die kurzen Wellen mehr verzögert als die langen; deshalb können die verschiedenen Wellenlängen mittels eines Primas ausgesondert werden. Ein freies Atom besitzt seine eigene Schwingungsperiode, ähnlich wie eine Stimmgabel sie besitzt, und demzufolge sendet es Licht von einer oder von einigen wenigen bestimmten Farben aus, genau wie

[1]) Einige derartige Versuche sind in letzter Zeit mit vollendeter Geschicklichkeit und mittels sehr feiner Instrumente durch Herrn Michelson in Amerika durchgeführt worden. Sie ergeben sämmtlich die vollständige Richtigkeit des Fizeau'schen Versuches und der Fresnel'schen Theorie. Andere Versuche, die sich auf die Theorie der Aberration und der Bewegung des Aethers in der Nähe der Erde beziehen, ergaben Resultate, die noch unverständlich und mit unseren bisherigen Begriffen und Annahmen unvereinbar sind. (Siehe Nature Band 45 S. 499, 549, „Aberration".)

eine Stimmgabel einen bestimmten Klang oder mehrere bestimmte Klänge, sogenannte „harmonische Töne", aussendet. Nach der Tonhöhe lässt sich die Schwingungszahl der Stimmgabel bestimmen, nach der Farbe des Lichtes die Zahl der Atomschwingungen.

Wenn wir von schwingenden Atomen reden, so wollen wir damit nicht sagen, dass sie als ein Ganzes hin und her schaukeln; wahrscheinlicher ist es, dass sie sich biegen und dass sie wie eine Stimmgabel oder eine Glocke vibriren; wir wissen das, weil es leicht ist, die freien Atome eines Gases vibriren zu lassen. Wir können überhaupt die Schwingungen der Atome nur im gasförmigen Zustand erforschen; sind sie fest an einander gelagert in flüssigem oder festem Zustande, so sind sie behindert, und allerhand sekundären Schwingungen unterworfen. Auch dann schwingen die Atome ohne Zweifel hin und her — und thatsächlich werden diese erzwungenen Schwingungen in jeder erdenklichen Weise ausgeführt — aber die einfache Schwingungsperiode des freien Atoms geht verloren.

Um das Verhalten der freien Atome zu studiren, nehmen wir ein möglichst verdünntes Gas. Wir erwärmen es und scheiden alsdann die Wellen aus, die es im Aether erregt, dadurch, dass wir ein dreiseitiges Prisma gebundenen Aethers in ihre Bahn bringen.

Warum der gebundene Aether verschiedene Wellen in verschiedener Weise verzögert und damit das Licht

„dispergent" macht, das wissen wir nicht; nur so viel ist uns bekannt, dass ein Verhältniss zwischen der Grösse der Atome und der Grösse der Wellen besteht; dass die Atome sich am besten mit den kleinsten Wellen vergleichen lassen, und dass sie deshalb am stärksten auf diese einwirken. Es ist schon nicht leicht die Erscheinung der Brechung zu erklären; das Verständniss der Dispersion aber bietet ganz ausserordentliche Schwierigkeiten. Da jedoch die Thatsache selbst feststeht, so wird gewiss auch das Dunkel der Theorie über kurz oder lang erhellt werden.

Die Analyse durch das Prisma liefert den Beweis, dass jedes Atom der Materie seine eigene Schwingungszahl hat, genau wie jede Glocke. Es kann mehrere Farben aussenden, oder nur eine einzige, vielleicht hängt die Anzahl der ausgesendeten Farben davon ab, wie viel Anstösse (oder Wärme) es erhält; jedenfalls aber besteht seine Ausstrahlung in einer vollkommen bestimmten Auswahl und ist von der früheren Geschichte des Atoms ganz unabhängig. So zeigt jedes freie Natriumatom stets dieselbe Schwingungsart und hat sie stets gezeigt, gleichviel ob es zeitweilig mit irgend einem andern Element verbunden war, und gleichviel ob es auf der Sonne, der Erde oder auf dem fernsten Fixstern vorkommt. Dasselbe ist der Fall bei jeder andern Art der Materie; eine jede hat ihre eigene Art der Schwingung, die nur durch chemische Bindung verändert werden kann. Aus diesen Thatsachen ist die

Spektralanalyse hervorgegangen, jene neue Art der chemischen Analyse, welche Substanzen durch die einfache Beobachtung der Schwingungsverhältnisse ihrer freien Atome auffindet.

Die Atome sind winzige Körper; deshalb vollziehen sich ihre Schwingungen mit unermesslicher Geschwindigkeit.

Ein Natriumatom macht 5×10^{14} Schwingungen pro Sekunde, mit andern Worten es vollzieht fünfhundert Millionen Schwingungen in dem milliontel Theil einer Sekunde.

Es ist dies eine mittlere Geschwindigkeit; die ausgesandten Wellen wirken als tiefes Gelb auf das Auge.

4×10^{14} entspricht dem rothen, 7×10^{14} dem blauen Licht.

Ein Wasserstoffatom hat drei verschiedene Schwingungsperioden nämlich 4.577, 6.179 und 6.973, deren jede mit der unvermeidlichen Zahl 10^{14} zu multipliciren ist.

Möglicher Weise vollziehen die Atome auch langsame Schwingungen; allein unsere Netzhaut ist für Eindrücke solcher langsamen Schwingungen nicht empfindlich. Herr Abney hat jetzt eine Methode gefunden, auf photographischem Wege langsamere Schwingungen festzuhalten und sie auf solche Weise indirekt sichtbar zu machen. Wir dürfen also hoffen, ein viel weiteres

Gebiet der Atombewegung, als das der blos optischen, beobachten und kennen zu lernen.[1])

Der Unterschied zwischen freiem und gebundenem Aether macht sich uns noch anders als durch Lichterscheinungen bemerklich. Wenn wir zur Elektricität kommen, werden wir finden, dass mit einigen Arten der Materie mehr Elektricität verbunden ist als mit andern, so dass wir bei einer gegebenen elektromotorischen Kraft eine grössere elektrische Verrückung haben, dass also bei gewissen Arten der Materie die Elektricität dichter ist als bei anderen. Die Dichtigkeit der Elektricität im Raum setzt man gleich 1; die Dichtigkeit im Innern der Materie bezeichnet man mit K und nennt sie ihre specifische Induktionskapacität. In der Optik war die relative Dichtigkeit des Aethers im Innern der Materie n^2, das Quadrat des Brechungsindex (S. 449). Beide Grössen scheinen dieselben zu sein.

Ist der Aether also Elektricität? Ich sage nicht Ja, glaube auch nicht, dass in dieser allgemeinen Behauptung die Wahrheit liegt; aber dass eine Beziehung zwischen beiden vorhanden ist, kann nicht bezweifelt werden.

Was mir vorschwebt, geht dahin, dass positive und

[1]) Noch mehr Erwartungen dürfen wir an die modificirte Linienthermosäule oder das Siemens'sche Pyrometer knüpfen, das durch Herrn Langley weiter entwickelt und zu einer Reihe von Untersuchungen verwendet wurde. Langley gab ihm den Namen „Bolometer". Ferner an das noch neuere Radio-Mikrometer von Herrn Boys.

negative Elektricität zusammen vielleicht den Aether bilden, oder dass der Aether durch elektromotorische Kräfte vielleicht in positive oder negative Elektricität auseinandergespalten wird. Scheerende Kräfte übertragen transversale Schwingungen in Materie, die Widerstand leistet oder Starrheit besitzt. Der gebundene Aether innerhalb eines Leiters hat keine Starrheit und kann dem Scheeren nicht widerstehen. Ein derartiger Körper ist undurchsichtig. Durchsichtige Körper sind solche, deren gebundener Aether der scheerenden Spannung Widerstand leistet und zurückspringt. Solche Körper sind dielektrisch.

Wir besitzen keinen direkten Weg, um eine Kraft auf den Aether auszuüben; dagegen ist eine sehr indirekte Einwirkung möglich, weil wir die Materie derart anzuordnen verstehen, dass sie auf den mit ihr verbundenen Aether die nöthige scheerende (oder elektromotorische) Kraft ausübt. Wenn eine solche elektromotorische Kraft kontinuirlich auf den Aether in Metallen einwirkt, so entsteht ein kontinuirlicher und kaum auf Widerstand stossender Strom von beiden Elektricitäten in entgegengesetzter Richtung oder ein Konduktionsstrom.

Wirkt dagegen eine elektromotorische Kraft kontinuirlich auf den Aether in durchlässigen Körpern, so entsteht eine elektrische Verrückung, begleitet von elastischem Zurückgleiten und damit allen Erscheinungen der elektrischen Induktion (siehe Kap. III).

Gewisse chemische Verbindungen, die aus zweitheiligen Molekeln bestehen, *zertheilen* den gebundenen Aether der einzelnen Molekel, wenigstens sobald sie durch Dissociation gespalten ist. Statt dass jedes entstehende Radikal oder Atom etwas neutralen Aether mitnähme, nimmt das eine Atom eine gewisse bestimmte Menge positiver, das andere dieselbe Menge negativer Elektricität mit. Im flüssigen Zustande sind die Atome im Stande, sich zu bewegen, und eine kontinuirlich auf den Aether ausgeübte scheerende Kraft ruft in solchen Flüssigkeiten eine fortgesetzte Wanderung von der mit Elektricität verbundenen Materie hervor; die positive zieht in der einen, die negative in der anderen Richtung und damit sind alle Erscheinungen der Elektrolyse gegeben (Kap. IV).

Was ich hier über Elektricität sage, darf nur cum grano salis genommen werden. Sie dürfen diese Ansichten nicht als anerkannte Wahrheit, sondern nur als mein Suchen nach einer Anschauung betrachten, die mehr oder weniger, vielleicht eher weniger als mehr, mit den Thatsachen im Einklang steht. Ich kann nur sagen, dass diese Anschauung Thatsachen in Zusammenhang bringt und dass sie auf verschiedenen Wegen sich mir aufgedrungen hat.

Ist nun der Aether im freien Weltraume ein Leiter für Elektricität? Gewisse Thatsachen deuten darauf hin, dass dem so ist, und Edlund z. B. sagt geradezu, er sei ein fast vollkommener Leiter. Wem ein Sonnenfleck

oder eine andere Störung auf der Sonne entsteht, was zweifelsohne unter heftigen elektrischen Stürmen stattfindet, so wird der elektrische Zustand der Erde dadurch beeinflusst; wir haben dann Nordlichter und magnetische Störungen. Ist dies eine Induktion durch den Weltraum? Oder kann man diese Erscheinungen der Leitung und zwar dem Umstand zuschreiben, dass vielleicht ein mikroskopischer Theil eines abgezweigten Stromes in unser Bereich gerathen ist?

Was mich betrifft, so kann ich den Aether nicht als elektrischen Leiter ansehen. Maxwell hat gezeigt, dass ein Leiter undurchsichtig sein muss, und der Aether ist vor allen Dingen durchsichtig. Wir wären also zu der Schlusstolgerung genöthigt, dass dasjenige, was wir Leitung nennen, nur bei Vorhandensein von gewöhnlicher Materie vor sich gehen kann, oder mit anderen Worten, dass dieses Phänomen eher mit dem gebundenen als mit freiem Aether verknüpft ist.

Wenn wir nun zurückkehren zu der Fresnel'schen Theorie, wonach der Aether im Innern von grober Materie besondere Dichtigkeit besitzt, und auch zur Thatsache, dass der Aether inkompressibel ist, so entsteht naturgemäss die Frage: Wie kann der Aether durch Materie oder etwas Anderes verdichtet werden? Vielleicht geschieht dies nicht, vielleicht zieht die Materie den Aether nur an sich und vermindert damit sozusagen seine Spannung im Innern der Körper, ohne irgend eine wirkliche Zunahme von Dichtigkeit hervorzurufen.

Etwas derartiges wäre nach der Undulationstheorie von Mac Cullagh der Fall. Hierdurch lässt sich auch die Schwerkraft theilweise erklären; denn zwei Körper, die solchermassen am Aether zerren, werden dazu neigen, sich gegenseitig zu nähern. Schon Newton hat in einer der Fragen, welche den späteren Ausgaben seiner „Optick" als Anhang beigegeben sind, leise angedeutet, dass Gravitation entstehn würde, wenn die Materie eine Art von Druck auf den allenthalben vorhandenen Aether auszuüben vermöchte, und wenn der Druck im umgekehrten Verhältniss zur Entfernung wirken könnte. (Siehe Anhang.)

Newton verfolgte den Gedanken nicht weiter, denn damals standen ihm keine Thatsachen zu Gebote, um ihm die Existenz des Aethers zu beweisen oder ihm über dessen Eigenschaften Näheres zu sagen. Heute haben wir nicht nur die Gewissheit, dass ein Aether besteht, sondern wir wissen auch Einiges über seine Eigenschaften. Auch haben wir durch Licht und Elektricität gelernt, dass eine Beziehung zwischen Materie und Aether besteht, obgleich wir weder wissen warum, noch wie die Vorgänge beschaffen sind. Ich habe aber die Ueberzeugung, dass dies die Richtung ist, in welcher die schliessliche Erklärung von Gravitation und Kohäsion gefunden werden wird.

Wenn man über die Undulationstheorien von Fresnel und Mac Cullagh nachdenkt und beide zu der dringend

erforderlichen Uebereinstimmung zu bringen wünscht, so fragt man sich unwillkürlich, ob denn wirklich ein so grosser Unterschied zwischen Materie und Aether besteht, wie wir ihn bisher stillschweigend angenommen haben? Wäre es nicht möglich, dass beide nur verschiedene Modifikationen oder Manifestationen eines und desselben Dinges sind?

Und wiederum, wenn wir von schwingenden Atomen sprechen, wie können sie schwingen? und woraus setzen sich ihre Theile zusammen?

Nun gelangen wir zu einer der bedeutungsvollsten und merkwürdigsten Spekulationen der Neuzeit, einer Spekulation, die auf der experimentellen Thatsache beruht, dass die Elasticität eines festen Körpers erklärt werden kann aus der Bewegung einer Flüssigkeit; und dass eine in Bewegung befindliche Flüssigkeit Starrheit besitzen kann.

Ich hatte Ihnen gesagt, dass gerade Starrheit den Flüssigkeiten fehle. Dies ist wahr für den Zustand der Ruhe, nicht aber für den der Bewegung. (§ 156.)

Denken Sie sich einen vollkommen biegsamen O-förmigen Gummischlauch voll Wasser; er ist ganz schlaff und nachgiebig. Sobald Sie aber das Wasser in rasche Strömung versetzen, wird der Schlauch sofort steif; er wird ungestützt eine Weile aufrecht stehen können; eine Beule hinein zu drücken erfordert Kraft, und die Beule vergeht meist nicht wieder. Eine leicht ausführbare Form dieses Versuchs besteht darin, eine biegsame Kette

über eine Walze laufen zu lassen. Sie wird sofort steif, sobald man sie in rasche Bewegung versetzt.

Man nennt dies die Stromlinie eines Wirbels, und ein Wirbel besteht aus einer Anzahl solcher Stromlinien. Wenn sie mit einander parallel um eine gerade Achse oder einen Kern laufend auf einander geschichtet sind, so haben wir eine Wirbelröhre. Man kann eine solche mit leichter Mühe darstellen durch Umrühren von Wasser in einer Schüssel oder durch das Aufziehen des Ablauf-Ventils in einer Badewanne. Im grossen Maasstabe entstehen sie häufig in Amerika in der Luft und werden unter dem Namen Cyclone oder Wirbelstürme telegraphisch weiter gemeldet; sie werden auch „Depressionen" genannt. Die *Depression* selbst ist leicht bemerklich in der Mitte des in Drehung befindlichen Wassers. Diese Wirbel sind wunderbar dauerhafte Erscheinungen und währen oft lange Zeit; oft auch fallen sie plötzlich und unerwartet in sich zusammen.

Die Wirbelachse braucht nicht eine gerade Linie zu bilden; sie kann verschiedenartig ringförmig sein, die einfachste Form ist ein Kreis. Um einen Wirbelring herzustellen, müssen wir eine ebene Fläche einer Flüssigkeit haben und in einem gegebenen Augenblick jedem Atom dieser Fläche eine gewisse Vorwärtsgeschwindigkeit verleihen, und diese Geschwindigkeit je nach der Entfernung vom Rande der Fläche bemessen. Flüssigkeiten ohne Reibung stehen uns bis jetzt für diesen Versuch nicht zu Gebot; aber mit Flüssigkeiten

wie Luft und Wasser ist er leicht anzustellen. Wir brauchen nur eine kleine Menge Wasser durch das scharfkantige Loch eines Behälters auszutreiben, so wird die Reibung an den Kanten die gewünschte Wirkung hervorrufen. Der innere Theil stürzt rasch vorwärts und kehrt an der Aussenseite des Kernes zurück zum Loche. Allein der Strom treibt das Ganze vorwärts und thatsächlich kehrt kein Theil davon zurück, sondern rollt nur auf seiner Aussenseite, wie ein Rad auf einer Strasse rollt. In einer vollkommenen Flüssigeit und unter denkbaren Umständen würde er nicht weiterrollen, weil keine Reibung vorhanden wäre; in Luft oder Wasser hat ein Wirbelring jedoch stets eine bestimmte vorwärtstreibende Geschwindigkeit, genau wie das Rad einer Lokomotive, falls dieses nicht auf den Schienen gleitet.

In diesen Ringen haben wir eine wirkliche Luftmenge, die sich körperlich vorwärts bewegt und die gegen ein Gesicht oder eine Flamme mit merklicher Kraft anstösst. Eine Gasflamme lässt sich auf 10—12 m Entfernung durch ein unsichtbares Luftprojektil ausblasen. Es ist von der übrigen Atmosphäre durch seine eigenthümliche rotirende Bewegung unterschieden; durch Tabaksrauch wird der Wirbelring nur sichtbar gemacht; er wird dadurch nicht vollkommener.

Der Kern dieser Wirbel ist elastisch und besitzt Starrheit; der Kreis ist ihre Grundform; ändert sich diese, dann oscilliren sie um ihn herum. Wenn zwei Wirbel sich berühren oder sich auch nur nahe kommen, so

lenken sie einander ab und versetzen sich gegenseitig in Schwingungen.

Die Theorie der gegenseitigen Wirkung von Wirbelringen, deren Bahn sich kreuzt, ohne dass sie sich selbst sehr nahe kommen, ist in letzter Zeit durch Herrn J. J. Thomson weiter ausgearbeitet worden. Man kann die Wirbelringe ohne jede Berührung zum Vibriren bringen, indem man die Oeffnung, der sie entströmen, seitlich zusammendrückt; die geringste Abflachung eines Ringes macht ihn zur Ellipse; hier sehen Sie einen elliptischen Ring, der zwischen der Form einer hohen und einer flachen Ellipse hin und her schwankt. Hier ist eine viergeschweifte Oeffnung, wodurch die Vibrationen sehr deutlich sichtbar werden. Bei einer sechsgeschweiften Oeffnung werden die Schwingungen fast zu klein, um aus der Ferne gesehen zu werden, doch sind sie zuweilen auch da noch deutlich.

Die Ringe schwingen wie eine Glocke; vielleicht auch wie ein Atom schwingt. Obgleich aus Flüssigkeiten bestehend, besitzen sie Starrheit, denn sie bestehen aus Flüssigkeit in Bewegung. Die Wirbel sind unvollkommen, sie nehmen zu an Grösse und ab an Energie. In einer vollkommenen Flüssigkeit würden sie sich nicht so verhalten, sondern würden dauernd und unzerstörbar sein; freilich wären wir dann auch nicht im Stande, sie hervorzurufen.

Kommt Ihnen nun nicht der Gedanke, dass auch die Atome der Materie solche Wirbel sein könnten?

Wirbel in einer vollkommenen Flüssigkeit? Wirbel im Aether? Dies ist die Theorie von Sir William Thomson (jetzt Lord Kelvin). Noch ist sie nicht bewiesen; aber sie hat eine wunderbare Grösse, und man könnte von ihr sagen, sie verdiene es, wahr zu sein. Die Atome der Materie sind nach dieser Theorie nicht sowohl fremde Theilchen, die in den allgegenwärtigen Aether eingebettet sind, sondern Theilchen des Aethers, die in Folge ihrer Wirbelbewegung vom übrigen Aether differenzirt und thatsächlich zu festen Körpern geworden sind, ohne jedoch ihre Substanz zu verändern. Atome, die unzerstörbar und unerschaffbar sind; nicht harte unnachgiebige Körnchen, sondern bestehend aus wirbelndem Aether! Elastisch befähigt zu bestimmten Schwingungen, zu freier Bewegung und zum Zusammenstoss! Das Zucken und Schrumpfen der Wirbelringe zeigt die Art und Weise, wie wir uns die Schwingungen eines Atoms vorstellen können. Die Wirbel haben alle Eigenschaften der Atome mit Ausnahme einer einzigen: der Gravitation; und ehe wir die Theorie annehmen dürfen, muss sie uns die Gravitation erklären. Diese fundamentale Eigenschaft der Materie darf nicht in der Annahme einer künstlichen Batterie von überirdischen Wurfgeschossen ihre Erklärung suchen müssen. Wir dürfen nicht zum Anprall harter Körperchen zurückkehren, nachdem wir uns ein überall vorhandenes, zusammenhängendes Medium zugestanden haben. Dass die Wirbelatome gravitiren, muss bewiesen werden.

Aber bedenken Sie, wie schwach die Gravitationskraft ist. Jeder Gebildete, den Sie fragen, ob zwei Stücke Blei von je ein Pfund Schwere sich gegenseitig anziehen, wird Ihnen mit „Nein" antworten. Er irrt sich natürlich, aber die Kraft ist ausserordentlich klein. Dennoch ist sie die Summe der Anziehung von Trillionen und Trillionen von Atomen; wäre die *allerkleinste* Wirkung eines jeden Atoms auf den Aether nachgewiesen, so würde dies zur Erklärung der Schwerkraft genügen. Niemand kann behaupten, dass Wirbelatome keinen solchen bleibenden allgemeinen Einfluss auf die Flüssigkeit, in der sie existiren, ausüben bevor nicht kleinste Quantitäten zweiter, dritter und jeder beliebigen Ordnung in Betracht gezogen und die Theorie der Wirbel in einer vollkommenen Flüssigkeit mit peinlichster, endgültiger Genauigkeit durchgearbeitet worden ist.

Bis jetzt ist die Theorie von Sir William Thomson noch nicht bewiesen; sie ist vielleicht wenig mehr als eine Spekulation, aber sie ist wohl werth, gekannt, studirt und geprüft zu werden. Sie kann stehen oder fallen. Selten reichen unsere Vorstellungen von den Vorgängen in der Natur an die Wirklichkeit heran; noch viel weniger vermögen sie sie jemals zu übertreffen. Wie grossartig müsste also die wahre Natur der Materie sein, wenn Sir William Thomson's Theorie sich als unrichtig erwiese.

Ich habe soeben den Versuch gemacht, Ihnen die einfachste Vorstellung vom materiellen Weltganzen zu

geben, die bis jetzt dem menschlichen Geist erschienen ist, nämlich die Vorstellung von einer allgemeinen Substanz, die vollkommen homogen, kontinuirlich und von einfachster Struktur ist, sich bis in die entferntesten denkbaren Grenzen des Weltraumes ausdehnt und überall gleichmässig vorhanden ist; die, theilweise in Ruhezustand befindlich oder in einfacher nicht rotirender Bewegung, die Schwingungen, die wir „Licht" nennen, weiterführt, oder, theilweise als Wirbel rotirend, dauernd vom übrigen Medium in Folge dieser Bewegung unterschieden ist.

Diese wirbelnden Theile sind das, was wir Materie nennen; ihre Bewegung verleiht ihnen Starrheit, und aus ihnen sind unsere Körper, sowie alle anderen aus Materie bestehenden Körper, die uns bekannt sind, aufgebaut.

Eine einzige Substanz, ununterbrochen und allen Raum erfüllend, die als Licht Schwingungen vollführt, die in positive und negative Elektricität sich spalten kann, als Wirbel die Materie bildet und durch Kontinuität, nicht durch Stoss, jede Wirkung und Gegenwirkung, deren die Materie fähig ist, weiter trägt: dieses ist die heutige Ansicht von dem Aether und seinen Funktionen.

VORLESUNG III

DIE LEYDENER FLASCHE

Gehalten in der Royal Institution am 8. März 1889

Eine der grossen wissenschaftlichen Verallgemeinerungen, die Faraday aufgestellt hat, lautet: Jede elektrische Ladung und Entladung ist im Wesentlichen die Ladung und Entladung einer Leydener Flasche. Ein einzelner Körper kann nicht geladen werden. Wird ein Körper positiv geladen, so erhält dadurch gleichzeitig ein anderer Körper eine negative Ladung und die beiden gleichen entgegengesetzten Ladungen sind durch Induktionslinien verbunden. Sie sind in der That nichts weiter als die Endungen dieser Linien. Eine Ladung kann ohne die andere nicht bestehen, ebenso wenig wie ein Bindfaden nur *ein* Ende haben kann; das andere mag versteckt, es mag in Fasern aufgelöst, aber es muss vorhanden sein.

Wenn ich also als bekannt vorausschicke, dass jeder geladene Körper eigentlich eine Leydener Flasche ist, so ergiebt sich aus dieser Thatsache sofort, dass unser heutiges Thema ein sehr umfangreiches ist; ja dass es sich über das ganze Gebiet der Elektricität erstreckt. Denn die Ladung der Leydener Flasche umfasst die gesammte Elektrostatik, während ihre Entladung, dadurch dass sie einen Strom erzeugt, das Gebiet der strömenden Elektricität einschliesst, mit Ausnahme desjenigen Theils, der mit den Erscheinungen stetiger Ströme zu thun hat. Ferner magnetisirt ein elektrischer Strom nothwendigerweise seine Umgebung, gleichviel ob er sich in gerader oder gekrümmter Richtung bewegt, ob er durch einen Draht fliesst oder die Luft durchschlägt; deshalb müssen wir auch auf das Gebiet des Magnetismus übergreifen. Endlich ist die Entladung der Leydener Flasche oscillirend und, da wir die Schwingungsbewegung, die wir „Licht" nennen, neuerdings als einen oscillirenden elektrischen Strom erkannt haben, so müssen wir auch das Gebiet der Optik in das Reich unserer Betrachtungen ziehen.

Obgleich aber unser Gegenstand eine so umfassende Behandlung zulässt, und obgleich wir stets bestrebt sein müssen, die grosse Tragweite der scheinbar einfachsten Thatsachen in diesem Zusammenhange vor Augen zu behalten, so gedenke ich heute nicht ins Weite zu schweifen, sondern mich möglichst eng an mein Thema zu halten: die Leydener Flasche in ihrer einfachsten

bekanntesten Form, bestehend aus einem Glasgefäss, zwei Staniolblättern und etwas Schellack.

Um das Laden einer solchen Flasche zu veranschaulichen, habe ich mir seit geraumer Zeit folgende mechanische Analogie einzuführen erlaubt. Man denke sich ein nicht dehnbares endloses Seil, das über Rollen läuft. Auf einer Strecke dieses Seils sind eine Reihe festhaftender Kugeln aufgezogen, die mit Gummibändern oben und unten in einen festen Rahmen eingespannt sind.

Das Seil soll die Elektricität darstellen; die Kugeln sind die aufeinanderfolgenden Schichten in der Dicke des Glases, oder, wenn man will, Atome dielektrischer oder isolirender Materie. Erhöhte Spannung des Seils bedeutet negatives Potential, während eine verminderte Spannung (die genaueste Analogie für Druck, die unter den Umständen möglich ist), positives Potential bedeutet. Die Kräfte, die das Seil bewegen, z. B. eine Winde oder ein Gewicht, bedeuten elektromotorische Kräfte; eine Klemme oder ein festes Hinderniss stellt einen Rheostat oder Ausschalter dar; eine längere oder kürzere Strecke Seil zwischen zwei Stoffschichten bedeutet eine positive oder negative Ladung.

Aus dem Diagramm ergiebt sich nun ohne Weiteres, wie die Flasche geladen wird.

Um sie zu entladen, entferne man die elektromotorische Kraft und löse die Klemme, d. h. man schliesse den Stromkreis. Alsdann wird der Zug in den Gummi-

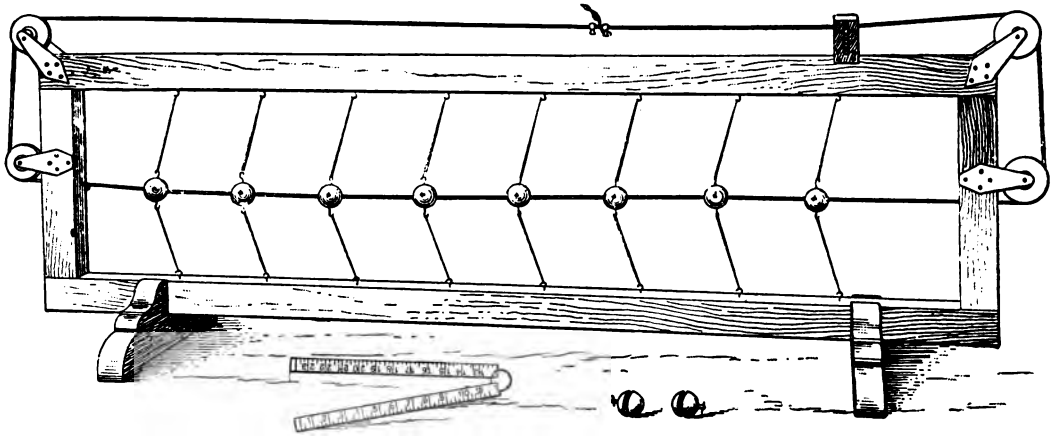


Fig. 67. — Modell zur Veranschaulichung dielelektrischer Erscheinungen, wie auf Fig. 6 S. 43. Das endlose Seil ist durch eine Presse geführt, die es festklemmen kann. Die Holzkugeln haften an dem Seil mittels Schrauben; will man Leitung darstellen, so lockert man die Schrauben. Die Kugeln auf dem Tisch sind aus Blei; an den senkrechten Theilen des Seils angebracht, bedeuten sie Erhöhung der Selbstinduktion. Die Holzkugeln sind mittels gewöhnlicher Gummibänder und Haken in den Rahmen eingespannt. Die Gummibänder können nach Belieben verdoppelt oder anderweitig verändert werden, um verschiedene specifische induktive Kapacität darzustellen.

bändern das Seil rasch rückwärts treiben, das Beharrungsvermögen der Kügelchen wird es nöthigen, über sein Ziel hinauszuschnellen, und die Flasche wird auf einen Augenblick eine umgekehrte Ladung erhalten. Allein schon schwingt das Seil zurück und eine Ladung mit demselben Vorzeichen wie anfangs, nur wesentlich schwächer, wird sich nun in der Flasche vorfinden, wenn man den Vorgang unterbricht. Setzt man ihn fort, so hören die Schwingungen allmählich auf, binnen Kurzem ist Alles ruhig und die Flasche hat sich vollständig entladen.

Dies Alles geht in der Leydener Flasche vor, und die ganze Serie von Schwingungen mit der periodischen Umkehrung der Ladungen in der Flasche vollzieht sich in dem unglaublich kurzen Zeitraum, in dem der Funken aufleuchtet.

Wovon hängt nun die Schwingungsdauer ab? Offenbar von der Elasticität der Gummibänder und dem Beharrungsvermögen der Materie, die bewegt wird. Wir wollen das einfachste mechanische Beispiel wählen, das der Schwingungen einer belasteten Feder, z. B. einer der Zungen einer Spieldose. Je grösser die Steifigkeit und je geringer die Belastung, um so schneller schwingt die Feder. Ein Mathematiker, dem man diese Grössen mittheilt, wird berechnen können, wieviel Zeit die Feder braucht, um eine vollständige Schwingung auszuführen, er wird ihre „Schwingungsperiode" bestimmen. (Versuch: Belastete Latte im Schraubstock.)

Das elektrische Problem und dessen Lösung sind genau analog. Der Elasticität der Feder entspricht in der Sprache der Elektricität die statische Kapacität, oder, wie sich Herr Heaviside ausdrückt, die „Permittanz". Dem Beharrungsvermögen der gewöhnlichen Materie entspricht das elektromagnetische Beharrungsvermögen oder die Selbstinduktion, nach Herrn Heaviside die „Induktanz".

Erhöht man eine dieser beiden Grössen, so verringert man die Schwingungsdauer. Die Erhöhung der statischen Kapacität entspricht einer Verlängerung der Feder; die Erhöhung der Selbstinduktion entspricht einer Belastung der Feder.

Die statische Kapacität erhöht man einfach dadurch, dass man sich einer grösseren Flasche bedient oder nach althergebrachter Art mehrere Flaschen zu einer Batterie vereinigt. Die Selbstinduktion erhöht man, indem man den Raum, den die Entladung zu magnetisiren hat, vergrössert, oder indem man sie einen gegebenen Raum stärker magnetisiren lässt. Denn das elektromagnetische Beharrungsvermögen wird ausschliesslich bedingt durch die Magnetisirung des den Strom umgebenden Raumes; und dieser kann beliebig vergrössert oder stärker magnetisirt werden.

Um den Raum zu vergrössern, lässt man einfach die Entladung statt eines kurzen Kreislaufs einen langen ausführen. Man kann sie durch einen Draht rings um das Zimmer oder durch ein Telegraphenkabel rings um

die Stadt senden. Alsdann wird das gesammte umkreiste Gebiet, sowie ein Theil des ausserhalb befindlichen Raumes mehr oder weniger magnetisirt. Wenn ich mehr oder weniger sage, so meine ich eher weniger als mehr; denn in Wirklichkeit handelt es sich um Wirkungen, die, ausgenommen in unmittelbarer Nähe des Leiters, kaum wahrnehmbar sind. Daher wächst die Selbstinduktion proportional der Länge des Drahts und nicht proportional der Grösse des umkreisten Raumes, vorausgesetzt, dass die Hin- und Rückleitungen weit genug von einander entfernt sind, um ihre gegenseitige wahrnehmbar magnetisirte Umgebung nicht zu stören. Siehe Anhang (e).

Es ist jedoch ebenso wirksam und weniger platzraubend, die Magnetisirung eines gegebenen Raumes dadurch zu erhöhen, dass man den Strom mehrere hundert Mal um den von ihm eingeschlossenen Raum kreisen lässt; dies geschieht, indem man eine Drahtspule in den Entladungsstromkreis einschaltet.

Eine dritte Art, die Magnetisirung eines gegebenen Raumes zu erhöhen, besteht darin, ihn mit einer sehr magnetisirbaren Substanz, etwa mit Eisen, auszufüllen. Dieses Verfahren ist sogar in vielen Fällen das wirksamste, da man durch Einführung eines eisernen Kerns die Magnetisirung und mithin auch die Selbstinduktion oder das Beharrungsvermögen des Stroms um etwa das 5000fache steigern kann.

Allein bei der Entladung der Leydener Flasche bringt

das Eisen keinen Vortheil. Der Strom oscillirt so schnell, dass der Eisenkern, selbst wenn er in die allerdünnsten Drähte aufgelöst wäre, durch die auf seiner äusseren Oberfläche inducirten, umgekehrten Gegenströme vor dem Magnetismus geschützt sein würde, wie Lord Rayleigh nachgewiesen hat. Der Kern wird also nicht einfach magnetisirt, ja weit entfernt, die Selbstinduktion des Entladungsstromkreises zu erhöhen, vermindert er sie vielmehr geradezu durch die Gegenwirkung dieser inducirten Ströme, d. h. er wirkt ungefähr wie ein Stück Kupfer.

Nachdem wir die Umstände festgestellt haben, von denen die Schwingungsdauer abhängt, haben wir uns zunächst mit denjenigen zu beschäftigen, welche das Abklingen der Schwingungen, d. h. die Gesammtdauer der Entladung bedingen.

Widerstand ist *ein* Faktor. Wenn wir die Schwingungen einer oscillirenden Feder vernichten wollen, so bedienen wir uns der Reibung oder wir lassen sie in einem zähen Medium schwingen. Alsdann werden ihre Oscillationen schnell gedämpft. Die Reibung kann so stark sein, dass die Oscillationen vollständig verhindert werden und die Feder aperiodisch in die Ruhelage zurückkehrt, oder sie kann noch stärker sein, so dass die Rückkehr sich ganz langsam, erst im Laufe von Stunden oder Tagen vollzieht. Bei sehr grossen Kondensatoren, wie sie im Telegraphendienst Anwendung finden, ist diese Art der Entladung häufig, bei der Leydener Flasche aber

kommt sie nur ganz ausnahmsweise vor. Man kann sie hervorrufen, indem man einen nassen Bindfaden, ein Kapillarröhrchen mit destillirtem Wasser, eine Holzplatte oder irgend einen anderen ausserordentlich schlechten Leiter in den Stromkreis einschaltet. Aber die Bedingungen, unter denen sich eine Leydener Flasche gewöhnlich entlädt, gleichviel ob die Entladung durch einen langen oder kurzen Draht, oder einfach durch ihre Knöpfe stattfindet, ob sie über den Rand läuft, oder das Glas durchschlägt, entsprechen der Oscillation und nicht der langsamen Rückkehr in die Ruhelage. (Entladung der Flasche, erst durch Draht, dann durch Holz.)

Selbst wenn die Flasche ganz langsam durch Holz oder Wasser entladen wird, ist die Entladung keine stetige; sie ist zwar nicht oscillirend, aber doch intermittirend. Sie vollzieht sich in einer Reihe von kleinen Stössen, wie wenn ein Körper über eine harzige Oberfläche gleitet. Dies geschieht, weil die Enden sich schneller entladen, als der Stromkreis die Elektricität zuführen kann; der Strom hört daher beständig auf und fängt wieder an.

Eine solche Entladung, die eigentlich aus einer Reihe kleiner Funken besteht, erscheint dem Auge zwar auch wie ein einziger Blitz, aber das Geräusch und die Heftigkeit der gewöhnlichen Entladung fehlen; auch kann man sie leicht mittels eines rotirenden Spiegels in ihre Bestandtheile zerlegen und so beweisen, dass sie inter-

mittirend ist. (Vorzeigen eines rotirenden Spiegels oder Wackeln mit dem Kopf oder einem Opernglas.)

Wir dürfen also getrost behaupten: Wenn die Entladung einer Flasche oscillirend ist, so ist sie intermittirend, und umgekehrt. Dazwischen giebt es noch eine Möglichkeit, die aperiodische Entladung; diese aber wird sich künstlich nur mit grosser Sorgfalt herbeiführen lassen und äusserst selten zufällig vorkommen.

Soweit haben wir Widerstand oder Reibung als Ursache für das Erlöschen der Schwingungen angeführt. Aber es giebt noch eine andere Ursache von höchster Bedeutung.

Die Schwingungen einer Zunge werden allerdings zum Theil durch Reibung und unvollkommene Elasticität gedämpft, zum Theil aber auch durch die Energie, die auf das umgebende Medium übergeht und in Schall umgesetzt wird. Die Erzeugung und Fortpflanzung von Schallwellen ist bei Musikinstrumenten ein Hauptfaktor für die Vernichtung der Schwingungen. Dasselbe gilt für die Elektricität. Die oscillirende Entladung einer Leydener Flasche stört das umgebende Medium und versetzt es in Schwingungen, die in den Raum hinauswandern. Sie wandern mit einer Geschwindigkeit von rund 300 000 Kilom. in der Sekunde, d. h. mit genau derselben Geschwindigkeit wie das Licht (Stimmgabel).

Die *zweite* Ursache also, welche die Schwingungen in einem Entladungsstromkreis vernichtet, ist die *Strahlung*, die *elektrische* Strahlung, wenn Sie den Unterschied

machen wollen. Sie weicht aber in keiner Weise ab von der gewöhnlichen Strahlung (oder der strahlenden Wärme, wie sie so oft in diesem Hause genannt worden ist (Tyndall); ebensowenig vom Licht, ausgenommen durch die physiologische Thatsache, dass der Mechanismus unserer Netzhaut nur auf einen bestimmten Umfang sehr kleiner Wellen reagirt, während die Strahlung im Allgemeinen Wellenlängen von 1 Mill. Meilen bis zu 1 Millionstel Zoll umfassen dürfte.

Diese grosse Entdeckung vom Wesen des Lichtes hatte ihren Keim in Faraday's Lehre von der magnetoelektrischen und elektrostatischen Induktion. Alsdann verwandte Clerk Maxwell den grössten Theil seines Lebens darauf, sie zu einer reifen, voll entwickelten Theorie auszubauen. Jetzt ist der experimentelle Beweis in Deutschland erbracht worden. Heinrich Hertz [1]), gegenwärtig Professor an der Universität Bonn, ist ein junger Forscher allerersten Ranges. Unter Helmholtz geschult und als Mathematiker sowohl wie als Experimentator ungemein begabt, hat er sich durch eine Reihe glänzender Untersuchungen unsterblich gemacht, die das reife Korn unserer wissenschaftlichen Anschauungen geerntet und gleichzeitig breite Nebenpfade für die Forschung Anderer eröffnet haben.

Ursprünglich wollte ich Ihnen heute Abend über die Hertz'schen Untersuchungen berichten. Allein die Versuche sind noch nicht in dem Maassstabe ausführbar,

[1]) Gestorben daselbst den 1. Januar 1894.

der für einen grossen Zuschauerkreis geeignet wäre; und ich selbst bin durch nicht ganz unähnliche, wiewohl selbstständige Forschungen, zu denen ich auf dem Umweg über Blitzableiter gelangte, davon abgehalten worden mehr zu thun, als einige Versuche zu meiner eigenen Erbauung zu wiederholen. (§ 189.)

Inzwischen sind wir von unserer Leydener Flasche etwas abgekommen und müssen zu ihr und ihren Oscillationen zurückkehren. Lassen Sie mich in kurzen Worten schildern, wie wir zur Erkenntniss der oscillatorischen Beschaffenheit ihrer Entladung gelangt sind. Die Thatsache wurde zuerst klar erkannt und bestimmt ausgesprochen durch Joseph Henry aus Washington, einen ausgezeichneten Experimentator, dessen Arbeitsmethode der Faraday's nicht unähnlich war, obgleich er wohl nur in geringerem Grade Faraday's erstaunliche Einsicht in komplicirte und dunkle Erscheinungen besass und auch durch die äusseren Umstände weniger begünstigt war.

Dieser grosse Forscher gelangte zu der Ueberzeugung, dass die Entladung der Leydener Flasche oscillirend sei, durch das Studium der eigenthümlichen Erscheinungen, welche eintreten, wenn man Magnetnadeln mit einer Flaschenentladung magnetisirt. Die Erscheinungen selbst wurden zuerst von Savary im Jahre 1824 beobachtet. Es zeigte sich, dass dünne Nadeln, wenn sie aus der magnetisirenden Spule entfernt wurden, nicht

immer in der beabsichtigten Richtung magnetisirt waren. Man bezeichnet diese Erscheinung als „anomale Magnetisirung". Eigentlich ist aber nicht die Magnetisirung anomal, sondern die Ströme, die keine einfache Richtung haben. Wir finden in einem Aufsatz von Henry aus dem Jahre 1892 folgende Stelle:

„Diese Anomalie, die so lange nicht erklärt werden konnte und die auf den ersten Blick unseren sämmtlichen Vorstellungen von dem Zusammenhang zwischen Elektricität und Magnetismus zu widersprechen scheint, wurde vom Verfasser nach längerem Studium in befriedigender Weise auf eine Wirkung der Entladung der Leydener Flasche zurückgeführt, die bis dahin noch nie bemerkt worden war. Es ist unrichtig, die Entladung, wie diese auch beschaffen sein möge (wir bedienen uns der Einfachheit halber der Franklin'schen Theorie) als die einfache Uebertragung eines imponderablen Fluidums von einer Seite der Flasche auf die andere darzustellen; die Erscheinung zwingt uns zu der Annahme, *dass sich die Hauptentladung in einer Richtung vollzieht und dann mehrere Reflexwirkungen hin und her stattfinden, bis das Gleichgewicht hergestellt ist.* Alle Thatsachen stimmen mit dieser Annahme überein und sie erklärt mit Leichtigkeit eine Reihe von Erscheinungen, die in älteren Werken über Elektricität aufgeführt sind, bisher jedoch unverständlich geblieben waren." [1])

[1]) Scientific Writings of Jos. Henry Bd. I S. 201, herausgegeben von der Smithsonian Institution, Washington 1886.

Henry selbst hat die oben stehenden Worte durch den Druck hervorgehoben. Stände dieser Passus vereinzelt da, so könnte man ihn für weiter nichts als eine glückliche Vermuthung halten. Allein dem ist nicht so. Henry gelangt zu diesem Ergebniss nach mühevoller Wiederholung und gründlichem Studium der Thatsachen, behält den einmal gefassten Gedanken beständig vor Augen und benutzt ihn bei seinen sämmtlichen übrigen Untersuchungen über den Gegenstand. Die Thatsachen, die er beobachtete, bestätigen meiner Ansicht nach seine Schlussfolgerung: folglich muss er als der ursprüngliche Entdecker von der oscillatorischen Beschaffenheit des Funkens angesehen werden, obgleich er keinen Versuch macht, die Erscheinung theoretisch zu erklären. Dies geschah zuerst in erschöpfender Weise im Jahre 1853 durch Sir William Thomson; die Versuche von Feddersen, Helmholtz, Schiller und anderen haben nur dazu beigetragen, sie zu befestigen.

Henry's Schriften sind erst seit Kurzem gesammelt und durch die Smithsonian Institution in Washington in zugänglicher Form herausgegeben worden; sie sind daher viel zu wenig bekannt. Die beiden Bände enthalten einen Reichthum an herrlichen Versuchen in klarer Darstellung und sind werth, gelesen zu werden.

Die Entdeckung, dass die Entladung der Leydener Flasche oscillirend sei, mag geringfügig erscheinen; aber sie ist es nicht. Man braucht sich nur zu vergegenwärtigen, dass die Hertz'schen Oscillatoren im Wesent-

lichen Leydener Flaschen sind, man braucht nur an den Ausdruck „elektromagnetische Theorie des Lichts" zu denken, um sich mit einem Schlage die gewaltigen Folgen dieser Entdeckung vor die Seele zu rufen.

Noch einen Auszug aus demselben Aufsatz von Henry [1]) muss ich Ihnen mittheilen und zwar einen besonders interessanten. Es geht daraus hervor, wie nahe er daran war oder hätte sein können, einige der Hertzschen Resultate zu erzielen, obgleich, wenn er sie erzielt hätte, weder er noch irgend ein anderer Forscher im Stande gewesen wäre, ihre wahre Bedeutung zu durchschauen.

Im Grunde war es doch das Genie Maxwell's und einiger anderer grosser theoretischer Physiker, deren Namen in aller Munde sind [2]), das den einfachen Induktionsversuchen von Hertz und Anderen ihre ungeheure Wichtigkeit verlieh.

Das Citat lautet wie folgt:

„Im Verlauf der auf diesen Theil unserer Untersuchungen bezüglichen Beobachtungen gelangten wir zu einem merkwürdigen Resultat betreffs der Entfernung, in welcher sehr kleine Elektricitätsmengen noch Induktionserscheinungen hervorrufen. Ein einziger un-

[1]) Loc. cit. S. 204.

[2]) Hierher gehört auch ein Mann, dessen Name zwar noch nicht in aller Munde ist, dessen umfassende Untersuchungen über elektromagnetische Wellen aber tiefer in dieses Gebiet eingedrungen sind, als im Allgemeinen bekannt ist; ich meine den ausgezeichneten mathematischen Physiker Herrn Oliver Heaviside.

gefähr 3 cm langer Funken aus dem primären Leiter einer Elektrisirmaschine, der in einem Zimmer des oberen Stockwerks auf das Ende eines Drahtstromkreises übersprang, erzeugte eine hinreichend starke Induktion, um Magnetnadeln zu magnetisiren, die sich in einem parallelen eisernen Stromkreis im Keller darunter befanden, also in einer senkrechten Entfernung von 9 m und getrennt durch zwei Fussböden und Zimmerdecken von je 40 cm Dicke. Der Verfasser neigt dazu, ein elektrisches *Plenum*" [mit andern Worten einen Aether] „anzunehmen; und der obige Versuch würde ergeben, dass ein einziger Funken hinreicht, um die Elektricität eines Raums von mindestens 120000 Kubikmeter Kapacität merklich zu stören; wenn man ferner bedenkt, dass der Magnetismus der Nadel die Differenz zweier Wirkungen ist, so kann man schliessen, dass die Zerstreuung der Bewegung fast dieselbe ist wie bei Erzeugung eines Funkens mit Stein und Stahl."

Allerdings, denn heute wissen wir, dass beide Vorgänge identisch sind.

Eine unmittelbare Folge der oscillatorischen Beschaffenheit der Flaschenentladung und gleichzeitig ein einfacher Beweis dafür, ist das Auftreten von Resonanzerscheinungen.

Es ist allgemein bekannt, dass eine Stimmgabel die andere auf mässige Entfernungen erregen kann, wenn beide auf denselben Ton abgestimmt sind. Es ist gleich-

falls bekannt, dass eine Stimmgabel eine mit ihr verbundene gespannte Saite zum Mitschwingen bringt, wenn beide auf denselben Ton oder auf einen harmonischen Oberton abgestimmt sind. Diese beiden Thatsachen haben in der Elektricität ihre Analogien. Meine Zeit erlaubt mir heute nicht, näher auf diesen Gegenstand einzugehen; ich möchte jedoch zwei Fälle erwähnen, die ich selbst beobachtet habe.

Die Entladung einer Leydener Flasche kann eine benachbarte, gleich abgestimmte Leydener Flasche so stark erregen, dass sie ihr Dielektricum durchschlägt, wenn es dünn und schwach genug ist. Die passend abgestimmten Impulse sammeln sich in dem benachbarten Stromkreis, bis sie durch eine Luftschicht von messbarer Dicke durchschlagen. Stört man die Uebereinstimmung der Stromkreise, indem man die Kapacität des einen verändert oder einen längeren Draht einschaltet, so hört die Wirkung auf, auch wenn der eingeschaltete Draht aus mehreren Windungen besteht und sonst dazu geeignet wäre, das, was man gewöhnlich unter gegenseitiger Induktion versteht, zu erhöhen. Sobald man die statische Kapacität vermindert, tritt die Wirkung wieder auf.

Wir haben hier die elektrische Analogie zu den sich gegenseitig erregenden Stimmgabeln. Leider ist die Wirkung zu gering, um sie einer grösseren Versammlung zu zeigen; ich selbst habe sie erst kürzlich beobachtet.

(Eine spätere Form desselben Versuchs, Fig. 54, ist besser sichtbar.)

Den zweiten Fall, der dem Erregen einer gespannten Saite von passender Länge durch eine Stimmgabel entspricht, habe ich voriges Jahr unter dem Namen des Versuchs mit dem Rückstoss (recoil kick) veröffentlicht. Der Stromkreis einer Leydener Flasche sendet durch einen Draht, dessen eines Ende mit ihm verbunden ist, Wellen, die als Lichtbüschel oder langer Funken von seinem entfernten Ende absprühen.

Ich will Ihnen heute Abend nur eine Phase des Versuchs zeigen, nämlich die Rückwirkung des im Draht angesammelten Impulses auf die Flasche selbst, wodurch sie entweder überläuft oder zerplatzt. (Ueberlaufen von $^1/_2$ l und 5 l Flaschen unter Einwirkung eines um das Zimmer geleiteten Drahts.)[1])

[1]) Während dieses Versuches bemerkte man, dass die vergoldete Tapete an der Wand Funken sprühte, in der Weise, dass jeder vergoldete Musterstern von einer gewissen Grösse sich in den nächsten entlud. Die Erscheinung ist wahrscheinlich auf eine Art von Resonanz zurückzuführen. Es ist erstaunlich, wie die Elektricität in Leitern umherspritzt, die sich in der Nähe einer Entladung befinden. So sprühte z. B. ein Fernrohr, das einer der Zuhörer in der Hand hielt, bei jeder Entladung der Flasche kleine Funken. Jeder Gegenstand, dessen elektrische Schwingungsperiode zufällig mit einem Oberton von der Hauptschwingung der Entladung zusammenfällt, verhält sich ebenso. Wenn Licht auf eine undurchsichtige Fläche fällt, so wird es ausgelöscht, wobei es winzige elektrische Ströme erzeugt, die sich in Wärme umsetzen. Das Funkensprühen der Tapete beruhte wahrscheinlich darauf, dass Wellen elektrischer Strahlung von den Wänden des Zimmers vernichtet oder

Die ersten Beobachtungen von Franklin über das Zerplatzen von Leydener Flaschen und die ausserordentliche Komplicirtheit und Mannigfaltigkeit ihrer Sprünge sind sehr interessant. (Siehe *Electrician* vom 29. März und 5. April 1889.)

Seine elektrischen Versuche, sowie die von Henry, sind durchaus lesenswerth, wenn sie auch aus einer Zeit stammen, in der die elektrische Wissenschaft noch in den Kinderschuhen steckte.

Es fällt Franklin auf, dass das Zerplatzen der Flaschen eine selbständige Erscheinung ist, welche nicht die normale Entladung vertritt, sondern sie begleitet. Wir wissen jetzt, dass sie durch dieselbe beschleunigt wird; der zwischen den Knöpfen überspringende Funken erzeugt so heftige Schwingungen, dass die Flasche in viel stärkere Spannung versetzt wird, als durch eine statische Ladung oder eine blosse Spannungsdifferenz zwischen ihren Belegungen; und wenn die Wellen auch nur im Groben abgestimmt sind, so muss die Flasche unbedingt überlaufen oder zerplatzen.

Darum muss eine Leydener Flasche stets ohne Deckel angefertigt werden und der Rand muss um ein sorgfältig abgemessenes Stück über die Belegungen vor-

reflektirt wurden und dabei elektrische Ströme erzeugten (§ 166). Dieses elektrische Mitschwingen macht bei der Aufstellung von Blitzableitern die strengste Vorsicht nöthig.

Die obige Erklärung ist seitdem durch ähnliche Vorgänge an anderen Orten vollkommen bestätigt worden.

stehen; nicht so weit, dass er aufhört, ein Sicherheitsventil zu sein und doch weit genug, um unter normalen Umständen das Ueberlaufen zu verhüten.

Und nun kommen wir zu dem eigentlichen Hauptthema unserer heutigen Vorlesung, nämlich zu der sichtbaren und hörbaren Demonstration der Oscillationen im Funken der Leydener Flasche. Eine solche Demonstration ist meines Wissens bisher noch nicht versucht worden, aber wenn Alles gut geht, wird sie uns leicht gelingen.

Zuerst wollen wir die Schwingungen hörbar machen. Zu diesem Zweck müssen wir ihre ungeheure Geschwindigkeit von einer Million oder hunderttausend Schwingungen in der Sekunde auf eine Schwingungsdauer herabsetzen, die innerhalb der Grenzen unseres Gehörs liegt. Dies geschieht, genau wie bei einer Sprungfeder, indem man erst ihre Schmiegsamkeit erhöht und sie dann spannt. (Funken aus einer Flaschenbatterie und deren verschiedene Geräusche.)

Ich benutze die grösste Flaschenbatterie, die mir zu Gebote steht, und entziehe diesen beiden Knöpfen einen mässig langen Funken. Er braucht nicht länger zu sein als $^3/_4$ cm. Trotz der grossen Kapacität ist die Schwingungsdauer noch weit über der Grenze des Hörbaren; man vernimmt nur den gewöhnlichen Knall. Nun vergrössere ich die Selbstinduktion des Stromkreises, indem ich eine grosse Drahtspule einschalte; sofort verändert sich der Charakter des Funkens; aus

dem Knall wird ein sehr hoher aber unverkennbar pfeifender Ton, ähnlich wie die Stimme einer Fledermaus. Eine zweite Drahtspule wird eingeschaltet und wieder vermindert sich die Schwingungsdauer, diesmal auf etwa 5000 Schwingungen in der Sekunde oder ungefähr den höchsten Ton auf dem Klavier. Wieder und wieder belaste ich den Stromkreis mit magnetisirbarer Materie, bis endlich der Funken nur noch 500 Schwingungen in der Sekunde hat und das eingestrichene oder höchstens das zweigestrichene c hören lässt.

Warum wir einen musikalischen Ton hören, ist klar: Das Geräusch des Funkens rührt her von der plötzlichen Erwärmung der Luft. Da diese Erwärmung periodisch erfolgt, so wird auch das Geräusch periodisch sein; aber beide werden, wenn ich mich so ausdrücken darf, eine Oktave höher klingen, als die elektrische Oscillation, weil jede vollständige elektrische Schwingung mit zwei Erwärmungsstössen verbunden ist. Die Wärmeerzeugung ist nämlich von der Richtung des Stroms unabhängig.

Nachdem wir so die Schwingungsdauer auf eine bequeme Geschwindigkeit herabgesetzt haben, bietet die optische Analyse keine Schwierigkeiten mehr. Ein einfacher mit der Hand hin und her bewegter Spiegel genügt, um den Funken in ein zackiges Band zu zerlegen, wie dies bei einer singenden oder tonempfindlichen Flamme geschieht; das Band sieht auch ähnlich aus.

In einem quadratischen, rotirenden Spiegel, der 2—3 Umdrehungen in der Sekunde macht, erscheint das Band bei dem tiefsten Ton ziemlich grobzackig; feine Zacken werden bei vier Umdrehungen in der Sekunde sogar bei schrill pfeifenden Funken sichtbar.

Die einzige Schwierigkeit bei der Wahrnehmung dieser Erscheinungen besteht darin, den richtigen Augenblick abzupassen. Sie sind nur während eines winzigen Bruchtheils einer Umdrehung sichtbar, wenn das Band auch ziemlich lang ausgedehnt erscheint. Je weiter der Funken vom Spiegel entfernt ist, um so länger erscheint das Band, um so schwerer ist es jedoch, den richtigen Moment zu erfassen.

Für einen einzelnen Beobachter lässt sich leicht eine Kontaktvorrichtung an der Achse des Spiegels anbringen, durch welche die Entladung an der richtigen Stelle der Umdrehung ausgelöst wird; alsdann kann er das Spiegelbild mit Bequemlichkeit durch ein Fernrohr oder Opernglas beobachten. Allerdings ist dies bei tieferen Tönen überflüssig.

Um die Erscheinung einem grösseren Kreise vorzuführen, giebt es verschiedene Vorrichtungen. Entweder man nimmt mehrere Funken statt eines einzigen; oder man vervielfacht das Spiegelbild des Funkens durch passend angebrachte Reflektoren, (die, wenn sie konkav sind, das Spiegelbild vergrössern); oder man bedient sich mehrerer rotirender Spiegel; ich selbst benutze

zwei, von denen der eine für die Zuhörer auf der Gallerie eingestellt ist.

Am zweckmässigsten scheint es mir aber, eine intermittirende und eine oscillirende Entladung zu verbinden. Man theile den Stromkreis in zwei Hälften; von diesen habe die eine einen hohen Widerstand, sodass sie intermittirt, die andere einen gewöhnlichen Widerstand, sodass sie oscillirt. Nun zerlege man mit dem Spiegel jeden Bruchtheil der intermittirenden Entladung in ein zackiges leuchtendes Band. Alsdann erhält man statt eines einzigen Funkens eine Serie von zahllosen Funken, die dicht genug auf einander folgen, um fast wie ein einzelner zu klingen und doch weit genug getrennt sind, um in dem rotirenden Spiegel von allen Seiten gleichzeitig sichtbar zu sein.

Diese Anordnung bedarf jedoch eines sehr starken Erregers. Trotz der gewaltigen Kraft dieser herrlichen Wimshurst'schen Elektrisirmaschine würde es zu lange dauern, bis sie unsere grosse Leydener Batterie geladen hätte. Die Wimshurstmaschine eignet sich für einen einzelnen Beobachter vortrefflich; für ein grosses Publikum aber braucht man einen Apparat, der die Batterie nicht einmal, sondern unzählige Male, ja gelegentlich bis zum Ueberlaufen lädt, und alles dies in einem Augenblick.

Um dies zu erreichen, muss ich Freund Wimshurst im Stich lassen und zu Michael Faraday zurückkehren. Vor dem Tisch befindet sich eine grosse Induktionsspule, deren Sekundärstromkreis den nöthigen Widerstand

besitzt, um eine intermittirende Entladung zu erzeugen. Ein einziger Funken aus diesem Induktorium genügt, um unsere Flaschen mehrmals bis zum Ueberlaufen zu laden. Der Entladungsstromkreis und alle sonstigen Versuchsbedingungen sollen unverändert bleiben. (Die Batterie wird durch das Induktorium geladen.)

Wenn wir nun statt der Wimshurstmaschine dieses Induktorium als Erreger benutzen und damit die Tonleiter angeben, während alles Uebrige beim Alten bleibt, so wird jeder Funken denselben Ton erzeugen wie zuvor, nur begleitet von einem schwachen Nebengeräusch, welches anzeigt, dass der Stromkreis sowohl wechselt als auch intermittirt. Drehen wir den Spiegel, so muss jeder Anwesende bei fast jeder Unterbrechung des Primärstromkreises der Spule einen oder den andern zackigen Lichtstreifen erblicken. (Rotiren des Spiegels, um die Funken zu zerlegen.)

Die musikalischen Funken, die ich Ihnen soeben gezeigt habe, erhielt ich als Nebenresultat[1]) einer Untersuchung über die Wirkung von Flaschenentladungen, die um schweres Glas oder Schwefelkohlenstoff geschickt wurden. Dass die Polarisationsebene des Lichts durch einen stetigen Strom oder durch irgend ein für die Lichtstrahlen passend angeordnetes Magnetfeld ge-

[1]) Wahrscheinlich wurde erst durch ein Gespräch mit Sir W. Thomson mein Interesse für langsame Oscillationen geweckt. Ich hatte meine Aufmerksamkeit bis dahin nur darauf gerichtet, die Schwingungen möglichst zu beschleunigen.

dreht wird, ist Ihnen bekannt. Weniger bekannt dürfte es Ihnen sein, dass diese Drehung durch den Strom einer Leydener Flasche bewirkt werden kann, und doch scheint mir diese Thatsache sehr interessant. Sie ist nicht gerade neu, ja nach heutigen Begriffen könnte man sie beinahe alt nennen, denn sie wurde schon vor sechs oder sieben Jahren von zwei höchst geschickten Experimentatoren, den französischen Physikern Bichat und Blondlot, untersucht.

Aber sie ist ausserordentlich interessant, weil sie zeigt, wie wenig, um nicht zu sagen wie absolut gar keine Zeit das schwere Glas braucht, um in den drehenden Zustand zu gelangen. Einige Beobachter glaubten bewiesen zu haben, dass schweres Glas erst allmählich in diesen Zustand gelangt, indem sie es zwischen den Polen eines Magneten rotiren liessen und dabei eine deutliche Abnahme der Wirkung bemerkten; allein ihre Schlüsse können nicht richtig sein, denn das polarisirte Licht folgt jeder Schwingung in einer Entladung. Ich habe selbst beobachtet, dass die Polarisationsebene bis zu 70000 Mal in der Sekunde hin- und herwechselte. (Siehe Phil. Mag. April 1889.)

Es giebt wenige Menschen, die diese Wirkung gesehen haben. Ja, ausser den Herren Bichat und Blondlot hat sie bis vor 4 Wochen wohl überhaupt Niemand gesehen. Heute aber hoffe ich sie den meisten Anwesenden, wenn auch vielleicht nicht Allen, sichtbar zu machen.

Ich benutze wieder die Wimshurstmaschine als Erreger und sende eine Entladung durch die Drahtspule, welche um diese lange, mit Schwefelkohlenstoff gefüllte Röhre gewickelt ist. Wird nun das analysirende Nicol'sche Prisma so eingestellt, dass es den Lichtstrahl auslöscht, so bemerkt man auf dem Projektionsschirm bei jedem Funken eine schwache, in nächster Nähe deutlich sichtbare, aber immerhin sehr rasch vorübergehende Aufhellung. (Versuch mit der Schwefelkohlenstoffröhre.)

Auch diese Aufhellung halte ich für oscillirend. Dies lässt sich unter Anderem beweisen, indem man eine Doppelquarzplatte zwischen die beiden Nicols einführt. Bei stetigem Strom ist die Doppelquarzplatte ausserordentlich empfindlich für Rotationen; die empfindliche Uebergangsfarbe verändert sich auf der einen Seite in Grün, auf der anderen in Roth. Bei oscillirendem Strom verhält sie sich vollständig passiv. (Doppelquarzplatte.)

Ein anderer Beweis besteht darin, dass, wenn man den Analysator in einem oder dem andern Sinne dreht, die besondere Aufhellung des Feldes abgeschwächt wird, und zwar gleichmässig in beiden Richtungen.

Aber der überzeugendste Beweis ist der folgende. Man reflektirt das durch die Röhre fallende Licht in unserm rotirenden Spiegel und betrachtet nun nicht den Funken, oder nicht ausschliesslich den Funken, sondern das schmale helle Band, in welches der letzte Lichtrest, der durch den Polarisator, die Röhre und den

Analysator hindurchgegangen ist, zerlegt wird. (Das Licht wird im rotirenden Spiegel zerlegt.)

Bei jedem Funken hellt sich der schwache Lichtschein zu einer Punktreihe auf. Wenn nun der Analysator etwas gedreht wird, so hellen sich einige Punkte auf, während die dazwischen liegenden erblassen; dreht man so weit, bis diese ganz verschwinden, so kann man die Drehung messen; sie ist ziemlich bedeutend. Die Punkte sind die Oscillationen des polarisirten Lichts; nebeneinander betrachtet, stimmen sie, soweit sich feststellen lässt, mit den Oscillationen des Funkens selbst absolut überein.

Aus der grossen Masse der mit der Leydener Flasche zusammenhängenden Erscheinungen habe ich nur wenige ausgewählt, um sie Ihnen heute Abend vorzuführen. Ich hätte Ihnen viel mehr zeigen können; eine noch grössere Anzahl eignet sich vorläufig noch nicht zur Vorführung vor einem ausgedehnten Kreise, da sie schwer und nur in unmittelbarer Nähe sichtbar sind.

So sehen wir ein altes abgenutztes Thema im Licht der Theorie in ganz unerwarteter Weise an Reiz und Glanz gewinnen. Aehnlich verhält es sich heutzutage mit vielen andern längst bekannten Thatsachen.

Die Gegenwart ist eine Epoche erstaunlicher Thätigkeit auf physikalischem Gebiete. Der Fortschritt zählt nach Monaten und Wochen, fast nach Tagen. Die lange Wellenreihe vereinzelter Entdeckungen schwillt

zu einer mächtigen Woge an, auf deren Gipfel wir schon ein grossartiges, herannahendes Allgemeingesetz zu unterscheiden beginnen. Die Spannung wird fieberhaft, manchmal fast peinlich. Uns ist zu Muthe, wie einem Knaben, der lange auf den stummen Tasten einer verlassenen Orgel gespielt hat; plötzlich haucht eine unsichtbare Macht belebenden Odem in die Bälge. Staunend nimmt er wahr, dass der Druck seiner Finger einen Widerhall weckt; und er zögert, halb entzückt, halb besorgt, dass er betäubt werde von der Tonfülle, die er nun willkürlich heraufzubeschwören vermag.

ANHANG

ANHANG

Bestimmte Gebiete der Elektricität haben in letzter Zeit besondere Bedeutung gewonnen, und da sie bisher in Lehrbüchern kaum eingehend behandelt sind, so wird es für Studirende eine Erleichterung sein, wenn ich hier einige Begriffe in eine weniger populäre Sprache als im Texte des Buches fasse.

Elektro-magnetismus

(*a*) Die durch direktes Experiment bewiesene Grunderscheinung des Elektro-magnetismus ist, dass ein vom Strome durchflossener Kreis genau einen Magneten von einem bestimmten Moment darstellt. Dies äquivalente Moment ist:

$$m\,l = \mu\,n\,A\,C,$$

wo A die Stromfläche, n die Windungszahl, C die Stromstärke und μ eine Konstante bedeutet, die von dem Medium im Inneren der Rolle abhängt und deren absoluten Werth wir bisher noch nicht feststellen können. (§§ 68, 69, 127.)

Magnetische Induktion, Reluktanz und Permeabilität

(*b*) Die Intensität eines Magnetfeldes in der Entfernung r von einem Magnetpol von der Stärke m beträgt $\frac{m}{r^2}$, und dieser Ausdruck giebt uns die Zahl der Kraft-

linien (oder Kraftröhren, wenn man diese Vorstellung vorzieht) in der Querschnitteinheit an. Die Gesammtzahl der Kraftlinien, die eine Kugelfläche mit diesem Radius durchschneiden, beträgt $\frac{m}{r^2} \times 4\pi r^2$, oder $4\pi m$.

Dieselbe Zahl von Kraftlinien muss jede beliebig gestaltete geschlossene Oberfläche durchschneiden, die den Pol umgiebt; in der That ist es die ganze Anzahl, die der Pol überhaupt besitzt. Man nennt sie den gesammten magnetischen Strom oder die Verrückung, oder die ganze magnetische Induktion, die von dem Pole ausgeht. (Die Bezeichnung „Induktion" stammt von Faraday, der sie etwa in dem Sinne von *Influens* benutzte; die gegenwärtige Bedeutung hat ihr erst Maxwell gegeben.)

Der gleiche Ausdruck giebt uns die Zahl von Kraftlinien, die von einem vollständigen Magneten ausgehen. Denn die Superposition der Kraftlinien des entgegengesetzten Poles lenkt zwar die Linien aus ihrer ursprünglichen Lage, aber sie verändert nicht ihre Anzahl. Bei zwei getrennten Polen gehen die Kraftlinien einfach von einem zum anderen. Bei einem zusammenhängenden Magneten bilden sie alle geschlossene Schleifen, die sich vom Nordpol zum Südpol durch die Luft und zurück durch den Stahl erstrecken. Bei einer Stromspule sind sie ebenfalls geschlossene Schleifen, die alle durch die Spule gehen und dann sich im umgebenden Medium ausbreiten. Also bilden die Kraftlinien in Wahrheit stets geschlossene Kurven, und es müssen die magnetischen Kreise ebensogut immer geschlossen sein, wie die elektrischen.

Bei dem einfachsten Fall, einer Ankerwickelung, ist eine Spule zu einem geschlossenen Kreise zusammengebogen (wie in Fig. 47 oder 29). Alle Kraftlinien liegen im Inneren und ihre Gesammtzahl beträgt $4\pi m$, also $\frac{4\pi\mu n A C}{l}$, wo l den mittleren Umfang des Ankerringes oder die Länge

des magnetischen Kreises bedeutet. Diesen Ausdruck nennt man den gesammten Strom der magnetischen Induktion, oder kurz die gesammte Induktion; wir wollen ihn mit I bezeichnen.

Nun ist in dem analogen Fall des elektrischen Stromkreises die Stromstärke gleich dem Verhältniss der elektromotorischen Kraft zum Widerstand. Den Widerstand können wir $\frac{l}{\varkappa A}$ schreiben, wobei $\varkappa$ die specifische Leitfähigkeit und A den Querschnitt des Leiters von der Länge l bedeutet.

Um die Analogie mehr hervorzuheben, wollen wir jetzt den magnetischen Strom so schreiben:

$$I = \frac{4\pi n C}{\frac{l}{\mu A}}.$$

Der Zähler dieses Ausdrucks wird öfters die magnetomotorische Kraft genannt, der Nenner aber magnetischer Widerstand, oder nach dem Vorschlag von Herrn Heaviside vorzugsweise magnetische *Reluktanz*.

Offenbar tritt hier μ an die Stelle der elektrischen Leitfähigkeit und ist also eine Art magnetischer Leitfähigkeit. Von dieser Anschauung ausgehend, hat ihr Sir William Thomson schon vor Jahren den Namen „Permeabilität" gegeben. (Siehe § 82.)

Ist der magnetische Kreis nicht einfach gebildet, sondern zusammengesetzt aus Theilen von verschiedenem Querschnitt, verschiedener Länge und verschiedenem Material hintereinander — wie z. B. bei einer Dynamomaschine — so kann man die magnetische Reluktanz (unter Beibehaltung der Analogie) schreiben:

$$R = \frac{l_1}{\mu_1 A_1} + \frac{l_2}{\mu_2 A_2} + \cdots\cdots$$

und $I = \frac{4\pi n C}{R}$, wie zuvor.

Gegenseitige Induktion

(*c*) Umgiebt eine einzelne Windung eines sekundären Drahtes diesen geschlossenen magnetischen Kreis (wie in Fig. 47), so ist I die Gesammtinduktion auf sie — unabhängig von ihrer Form und Grösse. Ist der Draht n' mal um den Ring gewunden, so ist die effektive Gesammtinduktion $n' I$, oder mit Einsetzung der Werte:

$$\frac{4\pi\mu n n' A C}{l}.$$

Dies ist also die Induktion der primären Spule auf die sekundäre.

Die Beziehung ist aber eine gegenseitige. Wenn also der gleiche Strom in der Sekundärspule fliesst, so wird eine gleiche Zahl von Kraftlinien durch das Innere der Primärspule gehen. Deshalb nennen wir den Vorgang *gegenseitige* Induktion. Wir schreiben sie MC, wo M der Koefficient der gegenseitigen Induktion ist, also

$$M = \frac{4\pi\mu n n' A}{l}.$$

A und l lassen sich leicht auf den einfachen geschlossenen magnetischen Kreis beziehen. Zwei getrennte Spulen, die sich irgendwo im Raum befinden, werden zwar auch einen angebbaren Werth besitzen, doch ist dessen Bestimmung sehr umständlich.

Selbstinduktion

(*d*) Statt anzunehmen, dass eine Sekundärspule den Induktionsstrom umgiebt, den die Primärspule hervorgerufen hat, können wir uns auch denken, dass die Primärspule ihre eigene Induktion umgiebt, und können so von ihrer „Selbstinduktion" sprechen als dem Werthe:

$$\frac{4\pi\mu n^2 A C}{l}.$$

Schreiben wir diese Grösse $L\,C$, so erhalten wir den Koefficienten der Selbstinduktion

$$L = \frac{4\,\pi\,\mu\,n^2\,A}{l}$$

oder

$$L = 4\,\pi\,\mu\,n\,n_1\,A,$$

wenn wir mit n_1 die Windungszahl pro Längeneinheit bezeichnen. (§§ 115 und 98.)

Auch hier hat wieder jede Rolle eine bestimmbare, aber meist schwierig zu ermittelnde Selbstinduktion. Sie bedeutet jedoch stets das Verhältniss der selbsthervorgerufenen magnetischen Induktion zu der Stärke des sie erzeugenden Stromes

$$L = \frac{I}{C}.$$

Werth des Selbstinduktions-Koefficienten für einige weitere einfache Fälle

(*e*) Das magnetische Feld, das ein grader Draht hervorruft, nimmt mit der Entfernung ab. In der Entfernung r von einem geraden Draht mit dem Radius a, der von einem Strom C durchflossen wird, beträgt es

$$\frac{2\,\mu\,C}{r}.$$

Dieser Werth giebt also die Zahl der Kraftlinien in der Flächeneinheit an.

Es beläuft sich daher die Gesammtzahl der Kraftlinien, die zwischen dem Draht und einer Entfernung b innerhalb eines Cylinders von der Höhe l enthalten sind, auf

$$\int_a^b \frac{2\,\mu\,C\,l}{r}\,dr = 2\,\mu\,C\,l \log \frac{b}{a}.$$

Befindet sich nun in der Entfernung b ein paralleler Draht, der von dem Rückstrom durchflossen wird, so wird auch dieser die gleiche Zahl von Kraftlinien erzeugen. Die Gesammtzahl der Linien pro Länge l der beiden parallelen Drähte beträgt demnach

$$4\mu l \log \frac{b}{a} \times C.$$

Da nun alle Kraftlinien zwischen den beiden Drähten hindurchgehen, so bezeichnet dieser Werth den magnetischen Gesammtstrom zwischen einer parallelen Hin- und Rückleitung. Der Koefficient von C ist also der Koefficient der Selbstinduktion für den Fall zweier dünner paralleler Drähte im Abstand b.

Für einen Kreisring mit dem Radius x wird hieraus bei einem Halbmesser a des Drahtes (siehe § 140):

$$L = 4\pi\mu r \log \frac{8r}{a}.$$

Immer bezieht sich dabei μ auf die Umgebung des Drahtes, nicht auf den Stoff des Drahtes selbst.

In beiden Fällen war angenommen, dass der Draht selbst sich gar nicht magnetisirt. Dies ist für äusserst schnelle Wechselströme zutreffend (§ 47). Für Kupferdrähte, die nicht zu nahe bei einander liegen, ist die Annahme nie *sehr* inkorrekt.

Stromenergie

(f) Ein Magnet mit dem Moment ml erleidet in einem Magnetfelde von der Stärke H ein Drehungsmoment $mlH \sin \vartheta$. Folglich erleidet eine einfache starre stromdurchflossene Spule ein Drehungsmoment $\mu n A C H \sin \vartheta$. Dreht sie sich um einen kleinen Winkel $d\vartheta$, so ist die geleistete Arbeit oder die Aenderung der potentiellen Energie

$\mu n A C H \sin \vartheta d \vartheta$. Folglich beträgt die potentielle Energie des Stromkreises in einer beliebigen Stellung $-\mu n A C H \cos \vartheta$. Diesen Ausdruck können wir IC schreiben, weil $nA \cos \vartheta$ die wirksame Fläche der Spule ist, d. h. ihre Projektion senkrecht zu den Kraftlinien, welche sie in der Anzahl μH pro Flächeneinheit durchschneiden.

Dies Relsultat lässt sich verallgemeinern. Ein Strom besitzt in einem Magnetfeld stets die Energie IC. Rührt das Feld von äusseren Ursachen her, d. h. besteht es unabhängig von dem Strom, so ist die Energie eine potentielle Spannungsenergie, welche danach strebt, den Stromkreis in Rotation zu versetzen. Dies ist das Princip der Elektromotoren. Rührt aber das Feld nur von dem Strom selber her — ist es ein selbst hervorgebrachtes und selbst erhaltenes Feld — so beträgt der Werth von I jetzt LC, und man bezeichnet die Energie dann passender als kinetische. Um ihren Werth zu erhalten, bringen wir uns in Erinnerung, dass Induktion und Strom gleichzeitig erlöschen, dass sie also nicht von einander unabhängig bestehen. Daher ist die Energie

$$\int_0^C I dC = \tfrac{1}{2} L C^2.$$

Dies ist die Arbeit, die beim Schliessen und Oeffnen des Stromes geleitet wird. (Kap. V.)

Pol in der Nähe eines Stromkreises

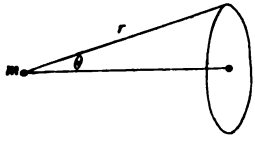
(*g*) Befindet sich ein einzelner Pol auf der Achse eines Kreises, so ist die Zahl seiner Kraftlinien, welche den Kreis durchschneiden, gleich

$$\frac{m}{r^2} \cdot 2\pi r^2 (1 - \cos \vartheta),$$

wobei der letztere Faktor den Flächeninhalt der vom Kreis

begrenzten Kalotte einer Kugel mit dem Mittelpunkt in m bedeutet. Der Ausdruck $2\pi(1-\cos\vartheta)$ misst das Verhältniss der einem Kegelwinkel gegenüberliegenden Fläche zu dem Quadrate des Radius und wird in Analogie mit dem Kreismaasse eines ebenen Winkels ein körperlicher Winkel genannt, d. h. der körperliche Winkel eines Kegels mit dem Scheitel in m und dem Kreis als Basis, oder der durch den Kreis begrenzte Oeffnungswinkel für ein in m befindliches Auge. Nennt man diesen Winkel ω, so ist die Zahl der Kraftlinien oder die magnetische Induktion gleich $m\omega$.

Wird aus dem Kreise nun ein Stromkreis mit dem Strome C, so hat das System die Energie $m\omega C$. Es besteht daher das Bestreben nach einer relativen Bewegung, und die Kraft in einer beliebigen Richtung entspricht der Aenderung von $m\omega C$ für die Einheit der Entfernung in jener Richtung.



Das Potential des Poles auf den Stromkreis ist $m\omega$; das Potential des Stromkreises auf den Pol $C\omega$. Hat der Pol eine beliebige Lage und die Stromspule eine beliebige Form, so lässt sich der Werth von ω nur noch mit Schwierigkeit bestimmen. Ist eine Reihe von Magneten gegeben, so ist $\Sigma(m\omega)$ ihr Potential auf den Stromkreis, oder die Induktion auf ihn.

Magneto-Elektricität

(*h*) Das Grundgesetz der Magneto-Elektricität lautet: Wenn die Induktion auf einen Stromkreis aus irgend einem Grunde eine Aenderung erleidet, so entsteht in dem Kreise

eine E. M. K., die der Aenderung der magnetischen Induktion gleich ist:

$$e = \frac{dI}{dt}.$$

Dies Gesetz ist freilich nicht ganz unabhängig von dem Grundgesetz des Elektro-magnetismus, vielmehr sind beide durch das Gesetz von der Erhaltung der Energie verbunden. Ich glaube dieser wichtigen Thatsache für den gegenwärtigen Zweck genügend Rechnung getragen zu haben, wenn ich das Gesetz von der Erhaltung der Energie in der Form hierher setze, in der es auf den Fall eines von einem konstanten Strom durchflossenen Leiters Anwendung findet, nämlich

$$ECdt = RC^2dt + CdI,$$

wo

$$RC = E - \frac{dI}{dt}$$

oder die resultirende E. M. K. nicht nur die aufgewandte E. M. K. bedeutet, sondern auch die magnetisch in dem Stromkreis erregte verborgene oder indirekte E. M. K. enthält. Dies ist die Faraday'sche Entdeckung der Magneto-Elektricität.

Verschiedene Arten der Erregung von Induktionsströmen

(*i*) Es kann I auf die verschiedenste Weise hervorgerufen werden. Z. B. kann es eine Komponente des Erdmagnetfeldes sein, also $nAH\cos\vartheta$. Oder es kann durch benachbarte Magnete entstehen, also $\Sigma(m\omega)$. Oder es kann die Induktion von einer anderen Spule sein, also MC'. Oder es kann von dem Strom herrühren, der die Spule selbst durchläuft, also LC. Die gesammte inducirte E. M. K. ist der Betrag der Aenderung der Summe aller dieser Grössen, also

$$-e = \frac{d}{dt}\left\{nAH\cos\vartheta + \Sigma(m\omega) + MC' + LC\right\}.$$

Dementsprechend kann sie auf vielerlei Arten erregt werden: durch Aenderung der Grösse oder Form der Spule; durch Aenderung ihrer Stellung zum Felde (wie bei dem Gleichstromdynamo); durch Bewegung von benachbarten Magneten (wie bei der Wechselstrommaschine); durch Aenderung der Stromstärke in anderen Stromkreisen oder Aenderung von deren Stellung (wie bei dem Induktorium); oder schliesslich durch Aenderung des eigenen Stromes oder des eigenen Koefficienten der Selbstinduktion. Aenderungen der letzten Art, $\frac{d}{dt}(LC)$, werden speciell E. M. K. der Selbstinduktion genannt und als Extraströme bezeichnet.

Primärstrom allein und Spule mit rotirendem Kommutator

(*j*) Die Gleichung für einen Strom von variabler Stärke ist für den einfachsten Fall eines einzigen Kreises:

$$E - RC = \frac{d}{dt}(LC),$$

wo E die aufgewandte E. M. K. ist. Sie lässt sich etwas ausführlicher schreiben:

$$L\frac{dC}{dt} + \left(R + \frac{dL}{dt}\right)C = E.$$

Dies zeigt, dass für den Fall von Stromkreisen mit variabler Selbstinduktion der Widerstand nicht seinen einfachsten Werth hat, sondern noch ein besonderes Glied besitzt, einen falschen oder scheinbaren Widerstand $\frac{dL}{dt}$.

Ein Stromkreis mit variabler Selbstinduktion ist z. B. ein solcher, dem fortwährend ein Theil seines Drahtes entzogen oder zugefügt wird, so dass ein Strom aufhören muss in Theilen, in denen er schon erregt war, und erregt in ruhenden Theilen; ein Fall ganz analog der Viscosität der

Gase, und häufig vor Augen geführt durch Reisende mit beträchtlichem Beharrungsvermögen, die einen in Fahrt begriffenen Zug verlassen oder besteigen. Ein Beispiel dieses Falles zeigt sich bei jedem Gramme-Ring, ja sogar bei jeder beliebigen Dynamo-Armatur, wenn sie mit einem Kommutator rotirt, ganz unabhängig von dem magnetischen Feld, in dem sie gerade rotirt. In allen solchen Fällen ist der effektive Widerstand grösser als R. Er ist $R + \frac{dL}{dt}$ oder $R + nL$, wo gewissermaassen die Selbstinduktion L in der Sekunde n mal zu dem Stromkreis hinzuaddirt wird.

Leydener Flasche

(*k*) In dem Fall eines sich entladenden Kondensators von der Kapacität S entspricht die angesammelte Elektricitätsmenge Q jedesmal der Gleichung

$$C = -\frac{dQ}{dt} \quad \text{oder} \quad Q = Q_0 - \int_0^t C\,dt.$$

Die Potentialdifferenz zwischen den Enden beträgt $\frac{Q}{S}$; dies ist die für den Strom aufgewandte E. M. K. Es lautet also die Gleichung für den Entladungsstrom:

$$L\frac{dC}{dt} + RC = \frac{Q}{S}.$$

Die Lösung der Gleichung ist für diesen Fall:

$$C = \frac{E}{pL} e^{-mt} \sin pt,$$

wo $m = \frac{R}{2L}$ ist, was die Gesammtdauer der Entladung bestimmt, und wo

$$p = \frac{1}{\sqrt{(LS)}} \text{ angenähert}$$

$$\left\{\text{genauer } \sqrt{\frac{1}{LS} - m^2}\right\}$$

ist, was die Schnelligkeit des Wechsels bestimmt; diese ist nämlich $\frac{p}{2\pi}$. Die Wellenlänge der ausgesandten Strahlung (Kap. XIV) ist:

$$\lambda = \frac{2\pi}{p} \cdot v = 2\pi \sqrt{\left(\frac{L}{\mu} \cdot \frac{S}{K}\right)}.$$

Bei diesen schnellen Schwingungen hat R seinen für konstante Ströme geltenden Werth ganz verloren, denn hier wird blos die Oberfläche des Drahtes benutzt (§§ 45 und 102). Nennt man den gewöhnlichen Werth R_0, so ist R für hohe Wechselzahl sehr angenähert [1])

$$R = \sqrt{\tfrac{1}{2} p \mu_0 l \cdot R_0}.$$

Hierin bedeutet l die Länge des Drahtes und μ_0 die magnetische Permeabilität seiner *Substanz* (§ 46).

Die Aussendung von Strahlung durch einen solchen Stromkreis strebt R noch mehr zu vergrössern (§ 142 und Seite 477). Siehe auch (*m*).

Wechselstrom

(*l*) Für den Fall, wo eine Spule oder Armatur in einem magnetischen Felde rotirt, gilt für den Strom folgende Gleichung:

$$-RC = \frac{d}{dt}(nAH \sin \vartheta + LC),$$

[1]) Siehe Rayleigh Phil. Mag. Mai 1886.

oder: $L\frac{dC}{dt} + \left(R + \frac{dL}{dt}\right) C = n A H \sin \vartheta \frac{d\vartheta}{dt}$;

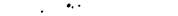
und die E. M. K. wechselt daher nach einer Sinus-Funktion. Schreibt man die Gleichung:

$$L\frac{dC}{dt} + R' C = E_0 \sin p t,$$

so ist die Lösung:

$$C = \frac{E_0 \sin (p t - \varepsilon)}{\sqrt{R'^2 + (p L)^2}},$$

wo $tg\,\varepsilon = \frac{p L}{R'}$. R' unterscheidet sich von dem einfachen R, wie schon in (j) ausgeführt, nur bei Anwendung einer Dynamomaschine mit Kommutator; dies ist aber häufig nicht der Fall. Der Nenner des obigen Ausdruckes soll Impedanz



genannt und mit P bezeichnet werden (siehe nächsten Abschnitt). Die Werthe haben die in dem kleinen Diagramm aufgezeichneten Beziehungen. Die Grösse ε ist der Betrag, um den der Strom hinter der aufgewandten E. M. K. zurückbleibt.

Die Hypothenuse mag als die aufgewandte E. M. K., die vertikale Kathete als die Gegenkraft oder inducirte E. M. K. und die Basis als die effektive E. M. K. bezeichnet werden, wenn in einer Spule durch irgend welche Mittel ein Wechselstrom erzeugt wird.

Zwei Definitionen des elektrischen Widerstandes und Unterschied zwischen beiden

(*m*) Die älteste Definition des Ausdruckes „elektrischer Widerstand eines Leiters ist die von Ohm gegebene, nämlich das Verhältniss

$$\frac{\text{in dem Leiter aufgewandte E. M. K.}}{\text{in ihm hervorgerufene Stromstärke}}.$$

Die zweite finden wir in dem Gesetz von Joule, nämlich das Verhältniss

$$\frac{\text{in einer Sekunde von dem Leiter verbrauchte Energie}}{\text{Quadrat des sie hindurchtreibenden Stromes}}.$$

Beide Definitionen stimmen überein für den Fall, wo kein reversibles Hinderniss vorhanden ist; wenn dagegen chemische Wirkung, reversible Wärmewirkungen oder eine variable magnetische Induktion eintritt, so wird ein Theil der Energie aufgespeichert und nur ein Theil verbraucht werden, und unter solchen Umständen weichen die Definitionen von einander ab. Es muss eine Unterscheidung zwischen beiden gemacht werden; der Ausdruck Widerstand ist füglich nicht für beide Werthe zu brauchen.

Man hat es bequem gefunden, die Bezeichnung Widerstand für die zweite Definition beizubehalten, den Koefficienten, der den Verbrauch der Energie angiebt; und man hat sich klar gemacht, dass in dem Gesammtwiderstand, wie ihn die erste Definition angiebt, die „elektromotorische Gegenkraft", „Polarisation" oder eine andere reversible Hemmung zu dem eigentlichen Widerstand hinzutritt. Ferner ist es üblich, in dem wichtigen Fall des Gesammtwiderstandes für Wechselströme die Bezeichnung „Impedanz" für die durch die erste der beiden Gleichungen definirte Grösse zu gebrauchen.

Allerdings lassen sich beide Definitionen des Wider-

standes sofort in Einklang bringen, wenn man in die Ohmschen Formel *resultirende* E. M. K. statt *aufgewandte* E. M. K. einsetzt. Auf diese Weise führt man durch einfache Subtraktion einer elektromotorischen Gegenkraft am einfachsten und besten Vorgänge wie die chemische und thermische Polarisation in die Rechnung ein; auch eine magnetische elektromotorische Gegenkraft, so lange sie stetig ist und von aussen kommt, wie in dem Fall der elektrischen Motoren. Bei Wechselstromgeneratoren dagegen muss über die Berechnungsweise des Werthes ihrer E. M. K. eine Verständigung erzielt werden. Wir haben oben gesehen, dass der Ausdruck für die Stromstärke als Zähler eine verringerte oder abgeschwächte E. M. K. und als Nenner eine Hemmung oder Impedanz aufweist, die ein Zusatzglied zu dem gewöhnlichen Widerstand enthält. Von diesem Gesichtspunkt aus ist der Begriff und Ausdruck „Impedanz" so wichtig geworden.

Der Werth dieser Grösse ist im Allgemeinen, wie bereits nachgewiesen

$$\sqrt{(p\,L)^2 + R^2};$$

die zwei Glieder kann man als den Trägheits- oder bleibenden Theil und den Reibungs- oder Verbrauchs-Theil bezeichnen (§ 38).

Ein Theil der verbrauchten Energie erscheint als Wärme in dem Leiter. Auf diesen Theil erstreckten sich die Jouleschen Versuche. Von einem anderen Theil wissen wir aber jetzt, dass er durch Strahlung in den Raum hinausgeht (§ 142). Beide zusammen sind in dem Zähler nach der zweiten Definition für R enthalten.

Inducirter Strom in einem Sekundärkreis. Transformatoren

(*n*) Hat die ringförmige Primärspule einen wechselnden oder intermittirenden Strom C und wird ein sekundärer

Kreis darüber geschoben, wie in Fig. 47, so beträgt die inducirte E. M. K. nach (*h*) und (*c*)

$$m\frac{dC}{dt} \text{ oder } 4\pi nn'\frac{\mu A}{l}\cdot\frac{dC}{dt}.$$

Sie hängt demnach direkt von der Windungszahl der Sekundärspule und der Wechselzahl des Primärstromes ab. Dies ist das Princip der Induktionsrollen und der sekundären Generatoren oder Transformatoren (§ 115). Die so erhaltene E. M. K. ist völlig regulirbar durch die Wahl eines geeigneten Werthes für n', je nachdem hohe Spannung (in Induktorien) oder hohe Stromstärke (für elektrische Schweissungen) gefordert wird. Man spricht von Transformatoren, weil von den zwei elektrischen Faktoren der mechanischen „Leistung" EC das gegenseitige Grössenverhältniss beliebig variirt werden kann, während das Produkt angenähert konstant bleibt, genau wie es bei gewöhnlichen Maschinen für den Kraft- und den Geschwindigkeitsfaktor der „Leistung" gilt. Was man an Kraft gewinnt, verliert man an Geschwindigkeit. Genau analog gewinnt man an E. M. K., was man an Stromstärke einbüsst und umgekehrt.

Die Gleichungen für den primären und den sekundären Strom sind:

$$E - RC = \frac{d}{dt}(LC + MC')$$

$$0 - R'C' = \frac{d}{dt}(L'C' + MC).$$

Aus der Lösung dieser Gleichungen ergiebt sich für die effektive Selbstinduktion des Primärkreises, wenn der Sekundärkreis kurz geschlossen ist und alle Widerstände klein sind, der Werth $L - \frac{M^2}{L'}$. Da nun bei einem einfachen geschlossenen Magnetkreis

$$L : L' : M = n^2 : n'^2 : nn',$$

so ist die effektive Selbstinduktion (und daher die Impedanz) des Primärkreises angenähert Null, wenn der Sekundärkreis kurz geschlossen ist — eine Thatsache von höchster Bedeutung für die Fabrikation der Transformatoren.

Geschwindigkeit der Uebertragung telegraphischer Signale für den einfachsten Fall

(*o*) Gegeben ein Paar paralleler dünner Kupferdrähte von der Einheit der Länge, nicht zu nahe bei einander, eine Hin- und Rückleitung im Abstand *b*. Der Radius jedes Drahtes sei *a*. Alsdann ist die Selbstinduktion dieses Theiles nach (*e*)

$$L_1 = 4\mu \log \frac{b}{a} = 1480 \log_{10}\left(\frac{b}{a}\right) \text{ Mikro-Secohms per engl. Meile}$$

und die statische Kapacität desselben Stückes ist nach einer ähnlichen Betrachtung

$$S_1 = \frac{K}{4 \log \frac{b}{a}} = \frac{1}{52 \log_{10}\left(\frac{b}{a}\right)} \text{ Mikro-Farads per Meile.}$$

Also ist

$$L_1 S_1 = \mu K.$$

Der Widerstand derselben Längeneinheit sei R_1.

Nun betrachte man ein Element der beiden Drähte von der Länge dx. Dann ist das Potentialgefälle zwischen dessen Enden, wenn der Strom C hindurchfliesst, und die Zunahme des Potentials mit der Zeit

$$\left.\begin{aligned} L_1 \frac{dC}{dt} + R_1 C + \frac{dV}{dx} &= 0, \\ \text{und} \quad S_1 \frac{dV}{dt} + \frac{dC}{dx} &= 0. \end{aligned}\right\}$$

Die Lösung dieser Gleichungen kann für den Fall einer sehr schnell wechselnden, am Anfangspunkt angreifenden E. M. K., $V_0 \sin p t$, geschrieben werden

$$V = V_0 e^{-\frac{m_1}{p_1} x} \sin p \left(t - \frac{x}{p_1} \right),$$

wo $m_1 = \frac{R_1}{2 L_1}$ und $p_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 S_1}}$ ist.

Nun hat eine „Welle" als Störung, die in Raum und Zeit periodisch ist, die Gleichung

$$y = a \sin (p t - n x),$$

wo y die Ausdehnung der Störung im Abstand x vom Anfangspunkt zur Zeit t bedeutet.

Der Koefficient a ist die Amplitude der Schwingung; n ist die periodische Raumkonstante nämlich $\frac{2\pi}{\lambda}$; p ist die periodische Zeitkonstante nämlich $\frac{2\pi}{T}$; die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen ist eine Raumkonstante in einer Zeitkonstante d. h. $\frac{\lambda}{T}$ oder $\frac{p}{n}$.

Folglich repräsentiren die beiden oben mit einer Klammer zusammengefassten Gleichungen Wellen, die längs der Drähte mit einer Geschwindigkeit $\frac{1}{\sqrt{L_1 S_1}}$ oder, wie wir sahen, $\frac{1}{\sqrt{\mu K}}$ sich fortpflanzen und eine Amplitude besitzen, die längs der Drähte nach einem logarithmischen Dekrement $\frac{1}{2} R_1 \sqrt{\frac{S_1}{L_1}}$ erlischt.

Diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Stössen entlang

von Drähten ist daher für diesen einfachen Fall genau dieselbe, wie die Geschwindigkeit der Fortpflanzung von Wellen durch den freien Raum, nämlich die Geschwindigkeit $\frac{1}{\sqrt{\mu K}}$ (§§ 128, 132, 137). Alle Komplikationen können die Schnelligkeit nur herabsetzen, nie vergrössern (§ 135).

Dimensionen der elektrischen Grössen

(*p*) Wir schreiben, wie üblich, *L*, *M*, *T*, *F*, *v* für die Einheiten der Länge, Masse, Zeit, Kraft, Geschwindigkeit und *A* für die Flächeneinheit. Die fundamentalen und feststehenden experimentellen Beziehungen ohne Rücksicht auf Einheiten und Maasssysteme sind folgende:

(Elektrostatik) $Q = L\sqrt{KF}$ . . . (1)

(Magnetismus) $m = L\sqrt{\mu F}$ . . . (2)

(Elektromagnetismus) $mL = \mu AC$ . . . (3)

der letztere Ausdruck kann auch geschrieben werden:

$$m = \mu v Q \quad . \quad . \quad . \quad (3')$$

in welcher Form er auf die magnetische Wirkung einer bewegten Ladung hinweist, die Rowland's Experiment nachgewiesen hat.

Kombiniren wir die drei Gleichungen, so erhalten wir

$$\sqrt{\frac{\mu}{K}} = \frac{m}{Q} = \mu v,$$

und hieraus

$$\mu K = \frac{1}{v^2} = \frac{\text{Dichte}}{\text{Elasticität}},$$

die wohlbekannte Beziehung zwischen den beiden Aether-Konstanten.

Durch Vergleichung vieler elektrischer Gleichungen mit den entsprechenden mechanischen finden wir, dass das Produkt LC an die Stelle des Moments (mv) tritt und dass $\frac{1}{2}LC^2$ die Stelle der kinetischen Energie $(\frac{1}{2}mv^2)$ vertritt, ja, dass es wirklich die Energie eines Stromes *ist* (siehe *f*). Es liegt nahe hieraus zu folgern, dass L die Trägheit in sich begreift und μ oder $4\pi\mu$ eine Art Dichtigkeit des betreffenden Mediums ist.

Nimmt man dies als richtig an, so wird $\frac{4\pi}{K}$ ein Elasticitätskoefficient (was die Elektrostatik wirklich nahe legt), weil $\mu K v^2 \quad 1$; und die Dimensionen aller elektrischen Einheiten lassen sich ohne jede willkürliche Konvention oder einen Unterschied zwischen elektrostatischen und elektromagnetischen Einheiten folgendermaassen bezeichnen:

Spec. Indukt.-Kap. $K = \frac{\text{Deformation}}{\text{Spannung}} = \frac{\text{Fläche}}{\text{Kraft}} = \frac{L\,T^2}{M} =$ Scheerbarkeit

Permeabilität $\mu = \frac{\text{Trägheit}}{\text{Volumen}} = \frac{M}{L^3} =$ Dichte

Elektrische Ladung $Q = L^2 = \frac{\text{Volumen}}{\text{Verschiebung}}$

Magnetischer Pol $m = \frac{M}{T} =$ Moment per Längeneinheit

Elektr. Stromstärke $C = \frac{L^2}{T} =$ Verschieb. $\times$ Geschwindigk.

Magnetisches Moment $ml = \frac{ML}{T} =$ Moment

E. M. K. $E = \frac{\text{Arbeit}}{Q} = \frac{M}{T^2} =$ Druck $\times$ Verschiebung, oder Arbeit per Flächeneinheit

Intensität des Magnetfeldes $H = \frac{F}{m} = \frac{L}{T}$ = Geschwindigkeit

Intensität des elektrostat. Feldes $\frac{F}{Q} = \frac{M}{L T^2}$ = Energie per Volumeneinheit

Oberflächendichtigkeit $\sigma = \frac{Q}{A}$ = blosse Zahl

Elektrische Spannung $\frac{2\pi\sigma^2}{K} = \frac{M}{L T^2}$ = Druck oder Spannung

Kapacität $S = \frac{Q}{E} = \frac{L^2 T^2}{M}$ = Verschieb. per Druckeinh.

Widerstandskoefficient $\frac{E}{C} = \frac{M}{L^2 T}$ = Impuls oder Moment per Volumeneinheit

Magnetomotor. Kraft $4\pi n C = \frac{L^2}{T}$ = Stromstärke

Reluktanz $\frac{l}{\mu A} = \frac{L^2}{M} = \frac{\text{Fläche}}{\text{Trägheit}}$

Magnet. Induktion $I = \frac{M}{T}$ = Rotationsmoment per Flächeneinheit

Induktionskoefficient (selbst- o. wechselseit.) $\frac{J}{C} = \frac{M}{L^2}$ = Trägheit per Flächeneinheit.

Dies ist eine Verbesserung des rohen Systems der Praxis, welches gar keine Dimensionen bald für K, bald für μ annimmt, je nachdem man von der Elektrostatik oder vom Magnetismus ausgeht; freilich ist es auch nur ein kleiner

Schritt vorwärts. Prof. Fitzgerald hat kürzlich die Vermuthung aufgestellt, dass von streng kinematischem Gesichtspunkt nach der Aethertheorie K und μ eine *Verlangsamung* des Wirbels bedeuten könnten. Durch diese Annahme wird alles einfach und von eindeutiger Dimension. Wo aber auch die Wahrheit liegen kann, jedenfalls ist anzunehmen, dass wir nicht mehr lange zwei verschiedene Maasssysteme behalten werden, das elektrostatische und das elektromagnetische; noch auch zwei verschiedene Reihen von Dimensionen für dieselben Grössen, da wir doch wissen, dass wohl kaum auch nur eine von ihnen die richtige ist.

Newton's Vermuthungen über den Aether

(*q*) Zu den 16 „questiones" am Schluss der Newton'schen Optik kommen in den späteren Ausgaben noch mehrere hinzu. Ich lasse hier diejenigen Theile derselben folgen, welche besonderen Bezug auf unsern Gegenstand haben, um dem Leser den Vergleich zu erleichtern.

„*Qu. 17.* Wenn man einen Stein in stehendes Wasser wirft, so werden dadurch an der Stelle, wo der Stein ins Wasser fiel, eine zeitlang Wellen erregt, die sich von dort aus in koncentrischen Kreisen auf der Oberfläche des Wassers bis zu grossen Entfernungen fortpflanzen. Auch die Schwingungen, welche ein Stoss in der Luft erregt, bewegen sich kurze Zeit hindurch vom Ort des Stosses aus in koncentrischen Kugeln bis zu grossen Entfernungen. Sollten nicht auf gleiche Weise, wenn ein Lichtstrahl auf die Oberfläche irgend eines durchsichtigen Körpers fällt und dort gebrochen oder reflektirt wird, in dem brechenden oder reflektirenden Medium an der Einfallsstelle Wellen oder Schwingungen erregt werden? . . .

Qu. 18. Wenn man zwei kleine Thermometer in zwei

grossen, hohen, umgestülpten Glascylindern derart aufhängt, dass sie die Gefässe nicht berühren, und einem dieser Gefässe die Luft entzieht und die Gefässe in dieser Verfassung aus einem kalten in einen warmen Raum bringt; alsdann wird sich das Thermometer im Vacuum ebenso leicht und fast ebenso schnell erwärmen, wie das nicht im Vacuum befindliche. Und wenn man die Gefässe in den kalten Raum zurückträgt, wird das Thermometer im Vacuum sich fast ebenso schnell abkühlen wie das andere Thermometer. Wird nicht die Wärme des warmen Raums durch das Vacuum hindurch befördert mittelst der Schwingungen eines viel feineren Mediums als die Luft, das in dem Vacuum zurückblieb, nachdem die Luft ausgepumpt worden war? Und ist nicht dieses Medium dasselbe wie das Medium, durch welches das Licht gebrochen und reflektirt wird und durch dessen Schwingungen das Licht den Körpern Wärme mittheilt [1]) und Zustände (fits) leichter Reflexion und Transmission bekommt? Und tragen nicht die Schwingungen dieses Mediums in warmen Körpern zur Intensität und Dauer ihrer Wärme bei? Und theilen nicht warme Körper ihre Wärme benachbarten kalten Körpern mit durch die Schwingungen dieses Mediums, die sich aus ihnen in die kalten fortpflanzen? Und ist nicht dieses Medium ausserordentlich viel dünner und feiner als Luft und ausserordentlich viel elastischer und beweglicher? Und durchdringt es nicht leicht alle Körper? Und erfüllt es nicht (vermöge seiner elastischen Kraft) den ganzen Himmelsraum? . . .

Qu. 19. Rührt die Brechung des Lichts nicht davon her, dass dieses ätherische Medium an verschiedenen Stellen verschieden dicht ist und das Licht stets von den dichteren Stellen des Mediums zurückweicht? Und ist nicht die

[1]) Man beachte diesen Satz, der an Präcision und Korrektheit das meiste weit übertrifft, was im Laufe unseres Jahrhunderts über die Absorption der Strahlung geschrieben worden ist. Man könnte ihn nur verbessern, indem man statt „mittheilen" *darin erzeugen* setzte, wie es die moderne kinetische Wärmetheorie verlangt.

Dichte desselben grösser im freien, luftleeren Raum und andern gröberen Körpern, als in den Poren von Wasser, Glas, Krystall, Edelsteinen und anderen festen Körpern?[1])

Qu. 21. Ist dieses Mittel nicht in den dichteren Körpern der Sonne, Sterne, Planeten und Kometen viel dünner als in dem leeren Himmelsraum, der sie trennt? Und verursacht nicht seine mit der Entfernung beständig zunehmende Dichte die Schwerkraft oder Anziehungskraft jener grossen Körper für einander und ihrer Theile für andere Körper; in der Weise, dass jeder Körper sich aus den dichteren Theilen des Mittels nach den dünnen hinzubewegen strebt? Denn, wenn dieses Medium innerhalb des Sonnenkörpers dünner ist als an seiner Oberfläche und ebenda dünner als $^1/_{100}$ Zoll von ihm entfernt und ebenda dünner als $^1/_{50}$ Zoll von ihm entfernt[2]) und ebenda dünner als am Saturn; alsdann sehe ich nicht ein, weshalb die Zunahme an Dichte überhaupt aufhören sollte und sich nicht vielmehr durch alle Entfernungen von der Sonne nach dem Saturn und noch weiter erstreckt. Und wenn auch die Zunahme an Dichte auf grosse Entfernungen ausserordentlich langsam sein sollte, so könnte sie doch, wenn die elastische Kraft[3]) des Mediums sehr gross wäre, hinreichen, um die Körper mit derjenigen Kraft, die wir Schwerkraft nennen, aus den dichteren Theilen des Mediums nach den dünneren hin-

[1]) Nach Newton's Ansicht wandert das Licht in grober Materie schneller als im Raum; darum kehrt er unsere von Fresnel herrührenden Anschauungen um. Dieselbe Umkehrung ist in dem folgenden Abschnitt über Schwerkraft beibehalten.

[2]) Es waren seine Versuche über Brechung, die ihn auf die Vorstellung brachten, dass sich die Eigenschaften des Aethers mit der Entfernung von einem Körper in dieser Weise allmählig verändern. Vor wenigen Jahren wären uns solche allmähligen Veränderungen ganz unwahrscheinlich vorgekommen; aber die neuesten Versuche von Michelson erschüttern alle vorgefassten Ansichten.

[3]) Soll dasjenige bedeuten, was wir Druck nennen. Dies ist natürlich nach Analogie der Schallwellen gedacht und stimmt mit unseren heutigen Kenntnissen nicht überein.

zudrängen. Und dass die elastische Kraft des Mediums ausserordentlich gross sein muss, ergiebt sich aus der Geschwindigkeit seiner Schwingungen. Der Schall wandert in 1 Sekunde mehr als 1140 engl. Fuss und in 7 bis 8 Zeitminuten ungefähr 100 engl. Meilen. Das Licht wandert in ungefähr 7 bis 8 Zeitminuten von der Sonne bis zur Erde, eine Entfernung, die ungefähr 70 000 000 engl. Meilen beträgt, wenn man die horizontale Parallelachse der Sonne auf 12″ berechnet. Und die Schwingungen oder Stösse dieses Mediums müssen, um die abwechselnden Zustände (fits) leichter Transmission und Reflexion zu verursachen, schneller sein als das Licht, also mehr als 700 000 Mal schneller als der Schall. Darum muss die elastische Kraft dieses Mediums im Verhältniss zu seiner Dichte mehr als 700 000 × 700 000 (d. h. über 490 000 000 000) Mal grösser sein als die elastische Kraft der Luft im Verhältniss zu ihrer Dichte. Denn die Geschwindigkeiten der Schwingungen elastischer Medien sind proportional der Quadratwurzel aus dem Verhältniss der Elasticität zur Dichte. . . .

Qu. 22. Könnten nicht Planeten und Kometen, wie überhaupt alle groben Körper, ihre Bewegungen mit grösserer Freiheit und weniger Widerstand als in irgend einer Flüssigkeit ausführen in diesem Aethermedium, das den ganzen Raum ohne Lücken genau ausfüllt und daher viel dichter ist als Quecksilber und Gold? Und könnte sein Widerstand nicht so gering sein, dass er gar nicht in Betracht käme? Zum Beispiel: angenommen dieser Aether (denn so will ich ihn nennen)[1]) wäre 700 000 Mal elastischer als unsere Luft und mehr als 700 000 Mal dünner; so würde sein Widerstand mehr als 600 000 000 Mal geringer sein, als der des Wassers. Und ein so geringer Widerstand würde in 10 000

[1]) Diese Auszüge sind hauptsächlich dadurch interessant, dass sie der frühesten Zeit einer Vorstellung vom Aether angehören, sowie durch ihre bemerkenswerthe Einsicht in viele Dinge, wenn sie auch nicht ganz mit unserem heutigen Wissen übereinstimmen.

Jahren kaum einen merklichen Unterschied in der Bewegung der Planeten verursachen. Wenn Jemand fragen sollte, wie ein Medium so dünn sein könne, so sage er mir doch, wie die Luft in den höheren Regionen der Atmosphäre mehr als 100 000 Mal dünner sein kann als Gold. Er sage mir, wie ein elektrischer Körper durch Reibung einen Stoff aussenden kann, der so dünn und fein und doch so stark ist, dass er bei seinem Ausströmen keine merkliche Gewichtsabnahme des elektrischen Körpers verursacht und sich durch eine Kugel von über 2 Fuss Durchmesser verbreitet und doch im Stande ist, in einer Entfernung von mehr als 1 Fuss von dem elektrischen Körper Blattkupfer oder Blattgold zu bewegen und aufzuheben? Und wie die Ausdünstungen eines Magneten so dünn und fein sein können, dass sie durch eine Glasscheibe hindurchgehen ohne einen Widerstand oder eine Abschwächung ihrer Kräfte zu erleiden und so stark, dass sie eine Magnetnadel hinter dem Glas ablenken?"

SACHREGISTER

Aberration 365
Abney 455
Absolute Bewegung 365
Absolutes Minimum der Elasticität 92
Absorption, Modell der 339
— relative 314
Abwechselnde Berührung, Entladung durch 67, 68
Actinische Strahlen 329
Aether, Abscherung, seine 457
— Beharrungsvermögen, sein 274, 440
— Bewegung durch den 365
— Dichtigkeit, seine 234, 335, 258, 276, 456
— Dichtigkeit, wahrscheinlicher richtiger Werth 291, 440
— Doppelte Beschaffenheit, seine 275
— Dualistische Theorie 276, 456, 457
— Elasticität, seine 21, 274, 291, 445
— — dieselbe erklärt 21, 326, 327
— u. Elasticität 19, 443, 456
— Fitzgerald's Modell des 324 bis 326
— Flüssigkeit und Starrheit, seine 275, 276
Aether, freier, einfacher, Struktur desselben 313
— freier u. gebundener 449, 456
— Funktionen, seine 467
— Gallertentheorie 19. 22, 444
— u. Gravitation 9
— Inkompressibilität, seine 287
— Konstanten, seine 290
— Konstitution, seine 277, 443, 444, 456, Vorwort
— u. Materie 460
— Maxwell's Modell des 324
— seine Starrheit, wahrscheinlicher, wirklicher Werth, 448
— Wirkung der Materie auf den 448
Ampère 112
Ampère'sche Ströme 191
— Theorie des Magnetismus 189 bis 191, 218
Analogien siehe Modelle
Anion 100
Anker, sein Zweck 204
Anomale Dispersion 315
— Magnetisirung 480
Anziehung u. Abstossung, verursacht durch Spannungen im Mittel 32
Anziehung der Atome, Intensität derselben 93
Arago's Versuch 451

Arbeit, die bei Durchwanderung eines Kreislaufs magnetischer Veränderungen geleistet wird 208
Arten der Fortpflanzung durch Wellen 17, 287
Atmosphäre, Dichtigkeit der 440
Atom, Elasticität desselben 442
— Elektricitäts- 92
— Erschütterungen 310
— Fortbewegung 98—105
— Intensität der Anziehung 93
— Ladung 88, 91, 92
— Potential 92
— Schwingungen 310, 453—455
— Strom innerhalb eines 191
— unendliche Eigenschaften 190
Atomigkeit 91
Aufrechterhaltung der Strahlung 309, 310
Auge, elektrisches 380
Ayrton 365, 415

Bahnen der Energie 114—118
Beetz 192
Beharrungsvermögen des Aethers 274
— im Kondensator gesucht 367
— des Eisens 299
— der Elektricität 16, 17, 52, 106—109, 113, 124—127, 211 bis 213, 227, 236, 366, 367, 473
— elektrisches, in Gasen 367
— elektro-magnetisches 473, 474
Beleuchtung, künstliche 316—320
Bell, Graham 427
Bequerel 428
Bewegung, absolute 365
Bichat und Blondlot 492
Bidwell, Shelford 357, 429
Bildliche Darstellung, ihre Vorzüge 74
Biot 11
Bismuth, Einwirkung des Magnetismus auf 358
Blitzableiter 123
Börnstein 368
Boltzmann 400
Boys, V. 12, 456
Brechung elektrischer Wellen 333, 335—374
Brechungsindex und specifische induktive Kapacität 309—316
Browne, Walter 432

Cambridge, Physiker aus 5
Carey Forster 355
Cavendish 5, 6
— Versuch 12, 32
— Sinn des Versuchs 287
Centrifugalkraft, analog der magnetischen Abstossung 218—222
Chemische Verwandtschaft 92, 93
Chemisches Aequivalent 90
Chemische Elasticität 279
Clausius 95
Clerk Maxwell, siehe Maxwell
Crookes 162, 367, 397, 406
Cyclone 462

Darstellung eines magnetischen Feldes 216
Diamagnetismus, Weber's Theorie des 192
— erläuternder Versuch des 195
Dichtigkeit des Aethers 234, 258, 276
— des Aethers und der Atmosphäre 440
— des Stroms 84
Dielektricum, Durchschlag. des 40
— Festigkeit, seine 154, 155
— geschichtetes 43—51
— Konstante, siehe spec. indukt. Kapac.
— Seilmodell 42, 46
Diffraktion 333
Diffusionsgeschwindigkeit in Kabeln 299
Dimensionen der elektrischen Grössen 517

Dispersion 313—316
— anomale 315
Disruptive Entladung 40, 44, 51, 262, 263
Dissociation 92—96, 128, 451
Doppelte Beschaffenh. des Aethers 275, siehe auch dualistische Theorie der Elektricität
Doppelte Umsetzung 94, 95
Dragoumis 396
Draht, Funktion, seine 114, 115, 296
Druck und dielektrische Festigkeit 154
— des Lichts 405
Dualistische Theorie der Elektricität 31, 33. 55, 97, 100—102, 212, 213—216, 275, 457, Vorw.
Durchdringbarkeit des Aethers 22
Durchlässigkeit von Isolatoren 333—336, 373, 426

Edlund 458
Einfach harmonische Bewegung, zerlegt 345
— ihre Schwingungsdauer 285
Einheit, natürliche, der Elektricität 92
Eiseimer, Versuch mit dem 10, 27
— Sinn des Versuchs 287
Eisen, Dichtigkeit des Aethers im 256
—draht, seine Eigenschaften 117, 119
— magnetische Wirkung, seine 198, 242, 256, 473, 474
— Permeabilität, seine 199, 234, 258, 474, 475
— Sättigung, seine 199
— Verzögerung von Signalen durch 242
Elasticität 283
— des Aethers 274
— — Erklärung derselben 326
— — wahrscheinlicher wirklicher Werth 291
Elasticität, chemische 279
— einer bewegten Flüssigkeit 211, 263, 326, 317, 463, 464
— Thomson's Theorie der 261, 326
Elastische Beutel 15, 19, 32, 40
— Zellen 261
Elektricität, absolutes Minimum der 92
— u. Aether 19, 443, 456, Vorwort
— Beharrungsvermögen der 15, 16, 52, 106—109, 124—127, 211—213, 227, 236, 296, 366, 367
— dualistische Theorie der 31, 33, 51
— fliesst stets in geschlossenem Kreise 9
— Flüssigkeits-Theorien 7, 13, 23, 30, 32
— Fortbewegung der 80, 166
— Geschwindigkeit der 215
— Gewicht, unbestimmbar 14
— ist keine Energieform 7
— Leitung der 80—101
— u. Licht 397, 420
— möglicherweise eine Art von Materie 7, 9, 415
— natürliche Einheit der 92
— positive und negative, siehe dualistische Theorie der Elektr.
— Pyro- 148
— Reibungs- 145
— Rotation der 108, 171
— specifische Wärme der 147, 361
— Strömungslinien der 124
— Uebertragung der 100—102
— Uebertragungsarten 81, 87
— Unterabtheilungen 1
— Verrückung der 43, 44, 53
— vier Wege, um ihrer bewusst zu werden 15
— was ist 415
— wie eine inkompressible Flüssigkeit 13, 19, 32, 287, Unterschiede 15

Elektricität, Wirbel von 108, 171, 217, 417
— wird weder geschaffen, noch zerstört 7, 9, 415
Elektricitätsatom 92
Elektrischer Analysator (Hertz) 373
—s Auge 380
— Licht, ein Uebergangsstadium 318
—e Oscillation, Modell, 332
— Resonanz 371, 484
— Strahlung, ihre Brechung 373
— — Geschwindigk. d. 290—316
— Wellenlänge 306, 307
—r Wind 214, 367
— Wirbelring 217, 237, 266
—e Zähigkeit 281
Elektrode 86, 89, 99, 103
Elektrolyse 458
— Gesetz der 88—96, 100
Elektrolyt 88—101
— Modell desselben 99, 102
— unterscheidet sich von Metallen u. Dielektricis 97, 100
Elektrolyte u. Gase 151—154
Elektrolytisches Beharrungsvermögen 366
—e Leitung 87—105
Elektromagnetisches Maassystem 291
Elektromagnetismus, grundlegende Thatsachen desselben 172, 499
Elektro-motorische Elasticität 277 bis 280
— Kraft 39, 45, 507
— — thermische 142, 143
Elektro-optische Wirkungen siehe Faraday und Kerr, sowie Hall
Elektrophor, Seilmodell 53—58
Elektrostatisches Feld auf ein magnetisches Feld superponirt 261
—es Maassystem 291
—e Verrückung innerhalb eines Ringmagneten 270
Elektrostatische Wirkung fortbewegter oder veränderlicher Magnetfelder 185, 264, 269
Empirismus jetziger Lichterzeugungs-Methoden 317
Energie, Bahnen der 115—118
— des Stroms 114—116
— Uebertragung, ihre, in die Ferne 248—254
— zwei Formen der 420
Entladung, Analogie der Stimmgabel 286, 470, 477
— Ausstrahlung von Energie 288
— eines Kondensators, Erlöschen der Schwingungen 285, 477
— — — drei Hauptfälle 283, 476
— — — deren Theorie 509
— disruptive 40, 44, 51, 262, 263
— durch abwechselnde Berührung 68, 69
— oscillatorische 52, 53, 113, 282—289, 470—494, 509
— Wellenlänge 306, 510
Entstehung eines inducirten Stroms im Sekundärstromkreis 244—247
Erfahrungsschluss 433, 434
Erzeugung eines magnetischen Feldes 265
Ewing 205, 209, 349, 360
Extrastrom 109, 111, 236

Faraday 5, 6, 11, 24, 25, 341, 423, 478
— elektro-optischer Effekt, Dauer 359, 491
— — — Modell 425
— — — verbunden mit Hall-Effekt 357
— Gesetze d. Elektrolyse 88—100
Feddersen 52
Feder, Analogie der Leydener Flasche 473
Feste Körper, ihre Eigenschaften beruhen auf ihrer Vergangenheit 206

Festigkeit, elektrische 280
Fitzgerald 374, 426, Vorwort
—s Aethermodell 323—325
— Resonator 400
Fizeau's Versuch 365, 449, 450
Flüssigkeit, durch Magneten in Rotation versetzt 181
— Magetisirung einer 205
— spiralförmiger Strahl 182
— u Starrheit des Aethers 275, 276
— stheorie der Elektricität 7, 12
Fluorescenz 331, 332
Fortbewegte Ladung 166—168, 263, 365
— — u. Magnet 184
Fortbewegung der Elektricität 80, 166
Fortschritte, neueste 376
Foster 355
Franklin 5, 6, 31
Fresnel 276
—s Aethertheorie 448—452, 459, 522
Funken, musikalische 487—492
— an der Tapete 485
Funkenstrecke, durch Belichtung verkürzt 369

Galilei 190
Gallerte, Analogie des Aethers 19, 22, 73
Galvanische Batterie 128—132
— elektromotorische Kraft, ihre 264
Galvanometer, Analogie 15
Gas, Beharrungsvermögen im 367
Gase u. Elektrolyte 151—152
— u. kinetische Theorie der 441
Gegenseitige Induktion 502
Geisslerröhre, rotirende Entladung in 183
Geladene Kugel, ihre Bewegung 167
— Luft durch Kupfergaze 11
Geschichteter Kondensat. 46—50
Geschwindigkeit der Elektricität, Wheatstones Versuch über 215
— elektrischer Stösse in Drähten 302
— Methoden dieselbe festzustellen 301
— der elektrischen Strahlung 291, 292—316
— der Gravitation 287
— der Ionen 104
— des Lichts 304—316, 445, 523
— — — u. der elektr. Strahl. in festen Stoffen, Vergleich zwischen 310
— des Signalisirens 34, 253, 295, 301, 515
Glas, Einwirkung des Lichts auf sein Leitungsvermögen 368
— schweres 424
Gleitung u. Rotation 241, 242
Goldfaden, Versuch mit dem 176
Gore's Eisenbahn 180
Gravitation siehe Schwerkraft
Green 6
Gregory 399
Grotthus 96, 155
Grove, Sir W. R. 428
Gyrostat, erklärt Elasticität 326
— Fehlen einer gyrostatischen Wirkung beim Magneten 108, 212, 366

HalbpermanenterMagnetismus 204
Hall 341, 355, 364
— Effekt 345, 355
— Effekt in Isolatoren 353
— Effekt, thermo-elektr. Theorie desselben 358, 359—364
— Effekt verbunden mit Thomson-Effekt 361—364
Hallwachs 369
Häutchen afficirt die Reflexion 333
Heaviside 199, 300, 473, 482
Helmholtz 95, 52, 175, 481
Henry, Joseph 479—483

Hertz 293, 369, 370, 375, 478
— Versuche 369—375 u. folgend.
Hicks, W. M. 326, Vorwort
Hohle Gefässe, Versuche in ihnen 8, 11, 287
Hohlräume im Mittel 23, 32, 33, 73
Holtz'sche Maschine 104
Hooke's Gesetz auf den elektrischen Fall angewendet 283
Hopkinson 315
Hughes 118, 242
Hydraulische Analogien versagen 115
-- Modelle 65—73
Hysteresis 209, 349, 351

Illustrationen 26—29, 42, 43, 46, 51, 53, 54, 55, 59, 63, 66, 67, 71, 72, 186, 187, 195, 198, 217, 219, 221, 222, 225, 226, 228, 231, 235, 238, 239, 241, 245, 257, 260, 265, 266, 324, 346, 353, 354, 356, 377, 379, 381 bis 386, 391, 427, 471
Impedanz 511, 512
— u. Widerstand 512
Impetus siehe Beharrungsvermög.
Inducirte Ladung 53—61
—r Strom 244—247, 504
Induktion, erläutert durch gespanntes Mittel 32
— gegenseitige 500
— in Leitern, die sich in einem magnet. Felde bewegen 259
— magnetische 198, 499
— Seilmodelle der 54
— Selbst- siehe Selbstinduktion
Induktionsrollen, Princip der 513
Induktive Kapacität 43
Inkompressibilität des Aethers 287
Innere Ladung 49
Ionen, Geschwindigkeit der 104
Isolatoren, Hall-Effekt in 353
— Durchlässigk., ihre, 332—337, 426
Isolirendes Mittel befördert Signale 296

Joule 85, 140

Kapacität 35
— ihre Wirkungen auf Signale 29
Kation 100
Käfig, Versuch mit dem 10
Kepler 423
Kerr 343, 426
— elektro-optisch. Effekt 341—350
Kinetische Theorien 438—442
Kohäsion 438, 443
— u. Gravitation 460
Kohlrausch 104
Kommutirter Stromkreis, sein Widerstand 508
Koncentration durch Reflexion 323
Kondensator, sein Beharrungsvermögen 32
— seine Entladung 283 - 289
— geschichteter 43
Kondensatoren 39
Kontaktkraft 132—141
Körperlicher Winkel 506
Kraftlinien 25—30
— magnetische 217
— wie Gummibänder 26
— wie Lichtstrahlen 30
— zwischen zwei Scheiben 27
Kräfte, die auf Leiter einwirken 253
Kreislauf, magnetischer 208
Kundt und Röntgen 426
Kupferscheibe, Versuch mit der 194
Künstliches Licht 316

Ladung 30, 32, 37
— Atom- 88, 91, 92
— durch Induktion 52—65
— fortbewegte 166—168, 184, 263, 365
— innere 44
— Oberflächen- 64
— Rückstands- 45
— scheinbare 63

Lamb, Horace 328
Langley 401, 456
Leiter, im magnetischen Felde fortbewegt 259
— Undurchlässigkeit, seine 335
— vollkommener 211, 213, 232, 246, 322, 339
— wie Hohlräume 23, 79
— Zusammentreffen elektrischer Strahlung mit 335
Leitung in Flüssigkeiten 87 – 105
— in Gasen 150—155
— in Metallen 81—87
— Oberflächen- 121
Leitungsvermögen, Magnet 180
— Einfluss des Lichts auf das 368
Lehmann 159
Leuchtkäfer 320
Leydener Flasche 39—41, 52, 113, 123, 468 – 495
— isolirte 67
— Methode, um die Fortpflanz.-Geschwindigk. elektr. Impulse in Drähten zu messen 302
— Periodenzahl 304
— sendet Wellen aus 288
— Theorie der 509
— Wellenlänge 286
— Zerplatzen der 486
Licht, Druck desselben 405
— Einwirkung, seine, auf Leitungsvermögen 368
— u. Elektricität 420
— erregt Ströme 371
— Geschwindigkeit, seine 304 bis 316, 445, 451
— Menge von der Oberfläche reflektirt 333, 334
— Vergleich zwischen den Geschwindigkeiten von Licht und elektr. Strahl. in fest. Stoffen 310
— violettes, Einwirkung auf die Funkenstrecke 369
— Was ist 414
— Wellenlänge, seine 309
Lichterzeugung, jetzige Methode der 318
— gewöhnliche indirekte Methode 319
— künstliche 316—320
Luftbatterie 136

Mac Alister, Donald, Versuch 12
Mc Cullagh's Aethertheorie 394, 460
Magnet, durch einen Strom in Rotation versetzt 185
— durch Rotation einen Strom erzeugend 188
— eine Flüssigkeit in Rotation versetzend 181
— ersetzt durch Spule 171—173, 502
— Fehlen einer gyrostatischen Wirkung beim 108, 212, 366
— u. fortbewegte Ladung 194
— u. Goldfaden 176
— ringförmiger 200, 204, 266 bis 270
Magnetische Anziehung und Abstossung 218—223
— Eigenschaften der disruptiven Entladung 262
— und elektrische Felder superponirt 261
— s Feld, Ausbreitung desselb. 244
— — Darstellung desselben 216
— — Erzeugung desselben 265
— — erzeugt elektrostat. Wirkungen 185, 264, 269
— — Modelle desselben 224—241
— e Funktion des Eisens 198, 242, 257, 299, 474
— Induktion 219, 499
— s Leitungsvermögen 199
— e Kraftlinien 195, 217
— r Kreis 198
— Kreislauf 298
— s Mittel, seitlicher Druck darin 226

Magnetisches Moment eines Stromkreises 499
—e Permeabilität 198—201, 234, 258, 499, 501
— — wahrscheinlicher, wirklich. Werth 291
— Reluktanz 199, 501
— Rotationsversuche 176—183
— r Schirm 231
— e Substanzen, ihre Durchlässigkeit 344
— Wirbel 218—223
Magnetisirung 189—192, 202, 265
— anomale 480
— von Flüssigkeiten 205
— mechanischer Vorgang 209
— von Stahl 206
— Wärme erzeugt durch 208
Magnetismus, Ampère's Theorie des 189—192, 218
— Fähigkeit ihn zu bewahren 202—205
— halb permanenter 204
— permanenter 202
— — eine Eigenschaft aller Substanzen 350
— Schwungrad, Analogie des 211, 236
Magnetomotorische Kraft 199, 501
Manganstahl 201
Marionette 435
Maasseinheiten, künstliches System der 291
— Verhältniss der 303
— System der 519
Materie u. Aether 460—467
— Wirbeltheorie der 404—467
Maxwell 5, 6, 12, 211, 375, 421, 478, 482
—'s Aethermodell 324
— Theorie des Lichts 375
— Versuch über Beharrungsvermögen 108
— Versuch üb. Fresnel's Theorie 451
Mechanische Analogie, siehe Modelle
Mechanismus der Strahl. 321—340
Medium, Spannung im 282
Melde's Versuch, Analogie, 302
Metalle, Leitung in 81—87
— Seilmodell 42
Metaphysische Argumente, Werth derselben 433
Methoden zur Herstellung einer Verbindung zwischen zwei Körpern 435—442
Michelson 365
Minchin 428
Mitschwingen oder elektrische Resonanz 485, 486
Mittel siehe Medium
Mittheilung, Arten der 439—441
Modell des Aethers 323
— der Absorption 335
— des elektr. Stromes 229
— eines Elektrolyts 98—101
— hydraulisches 65—73
— eines magnet. Feldes 224—243
— Seil- 42—65, 96, 427, 471
— der Strahlung 221
— der Selbstinduktion 235
— der Reflexion 335—340, 427
— der Rotation der Polarisationsebene 362
Molekularströme 191—197, 213, 217
—ketten 155—166
Musikalische Funken 487—492
Myers 379

Negative Elektricität, deren Vorhandensein, siehe dualistische Theorie der Elektr.
Newton 421
—'s „questiones" 520
— Vermuth. üb. den Aether 460
Niven 328

Oberflächenladung 61

Oberflächenleitung 122
Ocean einer inkompressibeln Flüssigkeit 21
Ohm's Gesetz 84, 274
Optik und Elektricität 375
Optische Streitfragen 374
Orgel, Gleichniss 318
Oscillation in Leitern 328—332
—speriode 285
— Richtung der 374, 393 u folg.
Oscillatoren, Hertz'sche 372
Oscillatorische Entladung 52, 53, 113, 282, 289, 468—494
— durch Spiegel zerlegt 487

Pech, Brechungsindex 374
— Prisma 374
Peltier-Effekt 140
Permanenter Magnetismus 202
— eine Eigenschaft aller Substanzen 350
Permeabilität 198—201, 234, 258, 499, 501
— nicht konstant 349
— wirklicher Werth 291
Perpetuum mobile 175
Pferd und Wagen 436, 437
Pictet, Raoul 405
Phosphorescenz 310, 320, 332
Photophon 429
Pol, Wirkung eines Stroms auf 174
Polarisation, elektrolytische 132
— elektrischer Strahlung 372
Polarisationsebene, Drehung der, Modell 362
Potential 33, 74
— der Atome 92
— gleichmässig in Leitern 23
— von isolirten Metallen 136
— des Poles auf Stromkreis 506
Poynting 17, 114—118, 127, 300
Principia 421
Probleme, ungelöste 364
Projektilmethode zur Herstellung einer Verbindung zwisch. zwei Körpern 440—442
Pyro-Elektricität 148

Quantivalenz 91
Quincke 348

Raum, kein Leiter 20
Rayleigh, Lord, 319, 475, 510
Reflektirtes Licht, Menge, 333, 335
Reflexion 333—340
— Koncentration des Lichts durch 323
— durch magnetisch. Mittel 344
— metallische 323
— Modell der 335—340, 427
Reibung zwischen Materie und Aether 273
— Widerstand 37, 83, 84
Reibungselektricität 145, 283
Relative Absorption 314
Reluktanz 199
Resonanz, elektrische 372, 484
Richtung der Schwingung 373
Ringmagnet 200, 204, 266—270
Rotation und Gleitung 241, 242
— eines Magneten durch Strom 185
— der Polarisationsebene 341
— — durch Entladung der Leyd. Flasche 492—494
— — durch Modell veranschaulicht 425
— zäher Flüssigkeit 119, 120
Rotationsversuche 176—183
Rotirende Entladung in Geisslerröhre 183
—r Magnet erzeugt Strom 187
Rowland 357, 517
Rückleitung 34
Rückstandsbildung 50

Sabine, Robert 428
Savary 479
Sättigung des Eisens 201
Schall, Fortpflanzung 87
Scheeren des Aethers 457, Vorw.

Scheerende Spannung 51
Scheinbare Ladung 63
Schienen u. Verbindungsstück 260
Schiller 481
Schuster 163
Schweres Glas 424
Schwerkraft und Aether 9
— Fortpflanzung der 287
— Kleinheit, ihre 466
— Newton's Ansichten über die 460, 522
— Theorie der 441, 443, 460
— verglichen mit chemischer Verwandtschaft 93
Schwingung siehe Oscillation
Schwingungsdauer 52
Schwingungszahl atom. Schwingungen 329—331
Schwungrad, Analogie des Magnetismus 247
Seebeck 141
Seilmodelle 41—65
Seitliche Fortpflanzung der Ströme 112, 117, 296
Sekundärstromkreis, Entsteh. eines Stromes in 244—247
— Generatoren 268
Selbstinduktion 34, 107, 111—113, 285, 502
— Erklärung der 473
— Koefficient der 502
— Modell der 234—243
— Wirkung, ihre, auf Signale 299
Selen 368, 429
Signale durch Kapacität u. Selbstinduktion beeinflusst 299
Signalisiren durch Draht 250, 295
— Geschwindigkeit 34, 254, 295, 303, 515
Smith, Willoughby 429
Spannung im Dielektricum 23
— längs magnetischer Kraftlinien 218—223
— im Mittel, Ursache der Anziehung und Abstossung 33
Spannung, Zurückschnellen des Mittels nach der 282
Specifische Induktionskapacität 44, 62, 274, 276
— verglichen mit Brechungsindex 309—316
— ist nicht konstant 348
— wahrscheinlicher wirklicher Werth, ihr 290
Specifische Wärme der Elektricität 147, 363
Specifischer Widerstand 84
Spiralförm. Flüssigkeitsstrahl 182
Spitzenrad, elektrisches 214
— Wind 367
Spule, als Ersatz für Magneten 171
Starrheit und Flüssigkeit des Aethers 275, 276
— einer beweglichen Flüssigkeit 212, 263, 327, 461
Stahl, Magnetisirung von 206
— Zustand von 207
Stehende Wellen, Hertz'sche 294, 339
Stokes, Sir G. G. 6, 365, 392
Strahlung, Aufrechterhaltung, ihre 309, 310
— Brechung 373
— elektrische, ihre Geschwindigkeit 290—316
— erregt Ströme 372
— Erzeugung von 327, 371
— Mechanismus der 221 - 340
— Methoden ihre Geschwindigk. zu beobachten 293—316
— Polarisirung 373
— Reflexion 373
— Vergeudung, ihre 318, 319
— Verlust an Energie 307
— Vorgang 388
— u. Wärme 80
— ihr Zusammentreffen mit Leiter 335 340
Strassenwagen, elektrischer 116
— mit Drahtseil 116, 437

Strom, als fortbewegte Ladung 365
— Ampère'scher 191
— durch Licht erregt 371
— durch rotirenden Magneten erzeugt 186
— durch Widerst. aufgehalt. 190
—-Energie 114—118, 504
— entsteht an der Oberfläche des Drahts 118, 119, 296
— Entstehung, seine, in sekundärem Stromkreis 244—247
— Erregung eines galvanisch. 264
— Extra- 107, 111—113, 236, 508
— Fortpflanzung, seine, durch seitliche Anstösse 114, 119, 296
— Hebel, eine Analogie 247
— im Atom 191
— inducirter 507
— Induktion 111
— in einem vollkommenen Leiter 232
— Intensität (Dichte) 84
— einen Magneten darstellend 499
— magnet. Eigenschaften, seine 110—113
— mechan. Kraft ausübend 255
— Molekular- 173—197, 213
— Schema 229
— Störung nicht auf Leiter beschränkt 110—117
— Rotiren eines Magneten unter seiner Einwirkung 185
— wärme 85
— Wechsel- 110
— Wirkung auf den Pol 174
— veränderlicher 234—243
— Vertheilung, seine 242
— Zähigkeit, Analogie 119
— Zeit, die er zum Entstehen braucht 118
— Zustand des Mittels in seiner Nähe 110
Strömungslinien 124—127

Tait 363
Tapete, Funken in der 485
Telegraph, Wirksamk. des Drahts 250—253, 295
Telegraphische Rückleitung 34
Telegraphiren, Einwirkung der Kapacität u. Selbstinduktion auf das 298, 299, 516
— Methoden 248—254
— Geschwindigkeit 248, 515
Telephonströme 123
Temperaturerhöhung durch Strom 85, 86
Tesla, N. Dynamomaschinen 398
Thermo-elektromotor. Kraft 141
Thermosäule 141, 142
— Anschauung des Hall-Effekts 358—364
Thompson S. P. 149, 182, 429
Thomson E. 407
Thomson J. J. 157, 161, 165, 328, 464
Thomson Sir W. (Lord Kelvin) 5, 6, 52, 135, 291, 327, 404, 424, 481, 491, Vorwort
— Effekt 144, 361
— Effekt in Verbindung mit Hall-Effekt 361—364
—'sche Elektricitätstheorie 19, 326
— Form des Volta-Effekts 137
— Theorie der Materie 464—466
Transformatoren 268, 513
Transversalschwingungen durch Aether fortgepflanzt 287, 296
Trouton 393, 395
Turmalin 148, 149

Ueberlaufen der Leyd Flasche 484
Uebertragung von Bildern durch Elektricität 430
— von Energie in die Ferne 114—116
— von Wärme, Wasser u. Elektricität 80
Ultraviolettes Licht, seine Wirkung auf Funken 369

Ultraviolette Strahlen 329
Undurchlässigkeit von Leitern 335 bis 340, 373, 426, 427
— von magnetischen Substanzen 344
— Modell 426
— u. Wellenlängen 403
Ungelöste Probleme 364
Unterschiede zwischen Elektricität u. Flüssigkeit 16
Umfang der Lichtwellen 478
Umkehrbare Wärmeerscheinung 139, 140

Vacuum versus Plenum 432
Valenz 91
Veränderlicher Strom 234—246
—s Magnetfeld u. elektrostatische Ladung 184, 264, 267
Verbrennung, als indirekte Lichtquelle 318
Vergeudete Strahlung 318, 319
Verhältniss der elektrostatischen und elektromagnetischen Einheiten 303
— der Methoden zur Feststellung von „v" 303, 422
Verrückung 50, 52, 53
Verwandtschaft, chemische 91, 92
Villari 360, 361
Viscosität siehe Zähigkeit
Vollkommener Leiter 211—213, 231, 232, 246, 323, 339
Volta's Kontaktkraft 132—138
— Effekt, Seilmodell 138
— Effekt, Thomson'sche Form 137
Voltameter 90, 131

Ward A. W. 361
Wasserstoff, Wanderungsgeschwindigkeit 103—104
Wärme, Arten der Uebertragung 79, 87
Wärme durch Magnetisirung erzeugt 208
— durch Strom erzeugt 85
— und Strahlung 79
Wechselstrom, Gleichung 510
— Widerstand 120, 509
Weber's Theorie des Diamagnetismus 192—197
Wellen 16
— Definition, ihre 419
— elektrische, Fortpflanzung derselben 17, 286—289, 477
— Hertz'sche 293, 372
— Länge der von Leyd. Flasche ausgesandten 306, 509
— stehende 339
Wellenlänge, elektrische 305, 306, 379
Wellenförmig, Bedeutung des Ausdrucks 419
Wheatstone's Geschwindigkeit der Elektricität 215
— Photometer 425
Widerstand 42, 83
— des kommutirten Stromkreises 508
— u. Impedanz 513
— magnetischer siehe Reluktanz
Widder, hydraulischer 106
Wiedemann u. Ebert 369
Wimshurst Maschine 490, 493
Wind, elektrischer 214, 367
Wirbel 16, 462—467
— Elasticität 463
— Oscillation der 464
—ring, elektrischer 217, 237, 266
—theorie der Materie 464 bis 467
Wirkung in die Ferne 432—437
Wulst, doppelter, durch ein Stück Pappe 215

Zähigkeit, Analogie des entstehenden Stromes 119

Zeit, nöthige, zum Entstehen eines Stroms 118—121
— nöthige, zum Entstehen des Faraday-Effekts 361, 492
Zerlegung einer oscillatorischen Entladung 488
Zerplatzen der Leyd. Flasche 486
Zersetzung 93—96
Zusammenhang zwischen Hall und Faraday 426, 427
— Effekte 355, 357

DRUCKFEHLER

Seite 11 Zeile 15 lies „*Kupfergase*" statt „Kupfergase".
„ 315 „ 6 lies „*anomal*" statt „anorm".
„ 436 „ 13 lies „*Stränge*" statt „Wagenspur".

Lippert & Co. (G. Pätz'sche Buchdruckerei), Naumburg a. S.

Verlag von Johann Ambrosius Barth in Leipzig.

HENNIG, E., Die Aesthetik der Tonkunst. 16 Bogen. 1896. M. 4.—

Der Verfasser der vorliegenden Arbeit tritt nicht unmittelbar in die Behandlung seines Themas ein; er geht vielmehr vom Allgemeinen (von einer Besprechung des abstrakten Schönheitsbegriffes, des Konkretschönen als eines Kunstschönen und des Systems der Künste) aus und schreitet zum Besonderen (zu seiner Aesthetik der Tonkunst) fort; er glaubt mit diesem Verfahren das Richtige getroffen zu haben; denn das Wesen einer bestimmten Kunst kann nur erkannt werden, wenn zuvor die allgemeinen Bedingungen ihres Bestehens klargelegt sind. Zu der gewählten Form der Untersuchung hält sich der Verfasser aber nicht nur deswegen berechtigt, weil diese durch das Wesen der Sache begründet ist, sondern weil sie sich auch aus praktischen Gründen empfiehlt.

LOMMEL, E. v., Lehrbuch der Experimentalphysik. 3. Auflage. XI. 556 Seiten mit 430 Abbildungen und einer Spektraltafel. 1896. M. 6.40, geb. M. 7.20

Das Buch ist bestrebt, die Grundlehren der Physik, ohne weitläufige mathematische Entwickelungen, dem heutigen Standpunkte unserer Kenntnisse gemäss allgemeinverständlich darzustellen. So reich die Literatur an Lehrbüchern der Physik ist, war doch ein wirklich brauchbares Buch über die ganze Physik unter Berücksichtigung der neuen Forschungen auf dem Gebiete der Elektrizität ein Bedürfniss. Der Umstand, dass seit dem Erscheinen der 1. Auflage i. J. 1893 schon die 3. grosse Auflage sich nöthig gemacht hat, dürfte dies am besten beweisen. Trotz der Beigabe einer Spektraltafel ist die 3. Auflage zu demselben billigen Preise zu haben, wie die früheren.

MACH, E., Populär-wissenschaftliche Vorlesungen. VIII, 336 Seiten mit 46 Abbildungen. 1896. M. 5.—, geb. M. 5.75

Inhalt: Die Gestalten der Flüssigkeit. Ueber die Cortischen Fasern des Ohres. Die Erklärung der Harmonie. Zur Geschichte der Akustik. Ueber die Geschwindigkeit des Lichtes. Wozu hat der Mensch zwei Augen. Die Symmetrie. Bemerkungen zur Lehre vom räumlichen Sehen. Ueber die Grundbegriffe der Elektrostatik (Menge, Potential, Capazität u. s. w.). Ueber das Prinzip der Erhaltung der Energie. Die ökonomische Natur der physikalischen Forschung. Ueber Umbildung und Anpassung im naturwissenschaftlichen Denken. Ueber das Prinzip der Vergleichung in der Physik. Ueber den Einfluss zufälliger Umstände auf die Entwickelung von Erfindungen und Entdeckungen. Ueber den relativen Bildungswerth der philologischen und der mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichtsfächer der höheren Schulen.

Verlag von **Johann Ambrosius Barth** in **Leipzig**.

POGGENDORFF's Biographisch-literarisches Handwörterbuch zur Geschichte der exakten Wissenschaften, enthaltend Nachweisungen über Lebensverhältnisse und Leistungen von Mathematikern, Astronomen, Physikern, Chemikern, Mineralogen, Geologen, Geographen u. s. w. aller Völker und Zeiten. III. Band (die Jahre 1858 bis 1883 und viele Ergänzungen umfassend (herausg. von Dr. W. Feddersen und Prof. A. von Oettingen). Etwa 20 Lieferungen à M. 3.—

Mit allseitiger Freude wird es begrüsst werden, dass ohne Fortsetzung und Ergänzung dieses einzig dastehenden Werkes erscheinen wird. Sie wird mit Zustimmung und auf Veranlassung des Herrn Dr. W. Feddersen, der bereits einen Theil des Materials von Poggendorff erhalten und das Werk bis 1883 im Manuskripte fortgeführt hatte, von Herrn Professor Dr. A. von Oettingen besorgt. Es sollen zwei Bände erscheinen, deren erster als Band III sich an Poggendorff's Werk anschliessen und bis 1883 incl. reichen, der zweite als Band IV die Zeit von 1884 bis zwei 1900 umfassen soll.

Der Preis von Band I und II ist auf M. 68.— ermässigt.

BOLTZMANN, Ludwig, Gustav Robert Kirchhoff. Festrede zur Feier des 301. Gründungstages der Karl-Franzens-Universität zu Graz, gehalten am 15. November 1887. (VIII, 32 Seiten mit Kirchhoff's Bildniss in Stahl gest. von A. Weger.) 1888. M. 1.—

BOYS, C. V., Seifenblasen. Vorlesungen über Kapillarität. Autorisirte Uebersetzung von Dr. G. Meyer. VIII, 92 Seiten mit 56 Figuren und 1 grossen Tafel. 1893. M. 3.—

Das Buch enthält unter Vermeidung mathematischer Entwickelungen eine auf Experimente gegründete Darstellung der Capillaritätslehre.

Sammlung von Portraits berühmter Physiker: H. von Helmholtz, H. Hertz, G. S. Ohm, G. R. Kirchhoff, G. Wiedemann, L. G. Gilbert, F. Neumann. — Die sechs Gründer der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin. Gr. Folio-Format (29 : 43 cm) chinesisches Papier. Preis für das Blatt M. 1.50.

Lippert & Cie. (G. Pätz'sche Buchdr.), Naumburg a. S.

FEB 6 - 1939